



Nuno Manuel Ortega Amaro

Licenciado em Ciências da Engenharia Electrotécnica e de
Computadores

Utilização de Energia Electromagnética dispersa no ambiente para alimentação de circuitos electrónicos

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Orientador: Stanimir Stoyanov Valtchev, Professor
Doutor, Faculdade de Ciências e Tecnologia da
Universidade Nova de Lisboa

Júri:

Presidente: Professor Doutor João Carlos da Palma Goes
Arguente: Professor Doutor Nuno Filipe Silva Veríssimo Paulino
Vogal: Professor Doutor Stanimir Stoyanov Valtchev



**FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA**

Setembro 2011

Utilização de Energia Electromagnética dispersa no ambiente para alimentação de circuitos electrónicos

Copyright © Nuno Manuel Ortega Amaro, FCT/UNL, UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Como um caminho nunca se percorre sozinho quero agradecer a todos, que de uma forma ou de outra me ajudaram nos diversos passos, nos diversos objectivos a que me propus, e agora alcanço.

Ao Professor Stanimir Vatlchev, meu Orientador, não só nesta Dissertação, mas no meu percurso pela Faculdade, pelos conselhos e ensinamentos sempre transmitidos.

Aos restantes Professores do Departamento de Engenharia Electrotécnica, que com maior ou menor relevo contribuíram para esta Dissertação, pois ela é o resultado de vários anos de estudo de diversas matérias.

Aos meus colegas, pelo apoio sempre dado. Ao longo dos anos muitos deles passaram de colegas a amigos, e também a eles se deve este sucesso.

Por último, e com uma importância até superior, um muito obrigado à minha família, aos meus pais, por todo o apoio, principalmente nos momentos menos bons. À Ana, a quem devo um agradecimento não só pelo apoio neste percurso, mas por tudo o resto. E a todas as outras pessoas, cujo nome não está aqui, mas não poderão ser esquecidas, por aquilo que me ensinam e me aconselham.

A todos um muito obrigado, este trabalho aqui apresentado é a minha forma de vos agradecer.

(Esta página foi propositadamente deixada em branco)

Sumário

O curto tempo de vida das baterias existentes no mercado e os problemas ambientais associados ao depósito destas, quando descarregadas, está a encorajar a comunidade científica a procurar alternativas para a alimentação de circuitos electrónicos. Estas alternativas devem poder alimentar os circuitos durante um período de tempo bastante superior às baterias, e ainda resolver problemas associados ao tamanho destas mesmas baterias.

No caso de circuitos electrónicos de baixa potência, uma forma de alimentação sem recorrer ao uso de baterias é utilizar uma tecnologia denominada “Recolha de Energia do Ambiente”, isto é, recolher a energia de fontes externas, dispersas no meio envolvente. Esta energia é de utilização gratuita e pode recolher-se das mais diversas fontes, nomeadamente: eólica, solar, vibração, termoeléctrica, electromagnética, entre outras.

Esta dissertação apresenta um sistema de recolha de energia electromagnética de frequências rádio (RF) e posterior conversão dessa energia numa tensão DC, que deverá ser utilizada para alimentação de circuitos electrónicos. Serão apresentadas diversas simulações e um protótipo deste mesmo sistema.

Palavras-chave:

Recolha de Energia Electromagnética do ambiente, Conversão RF-DC.

(Esta página foi propositadamente deixada em branco)

Abstract

The short lifetime of batteries on the market and the environmental problems associated with the deposition of these batteries when discharged, is encouraging the scientific community to seek alternatives to power electronic circuits. These alternatives should be able to feed the circuits over a period of time far superior when compared to batteries, and also solve problems associated with the size of those batteries.

In the case of low power electronic circuitry, a way to power these circuits without the use of batteries is using a technology called "Energy Harvesting", which corresponds to collect the energy from external sources dispersed in the environment. This energy is free to use and can be retired from various sources, including: wind, solar, vibration, thermal, electromagnetic, among others.

This dissertation presents a system for collecting radio frequency (RF) electromagnetic energy and subsequent conversion of that energy into a DC voltage, which should be used to power electronic circuits. Several simulations will be presented here as well as one prototype of the system.

Keywords:

Electromagnetic Energy Harvesting, RF to DC converter.

(Esta página foi propositadamente deixada em branco)

Índice de Matérias

1	Introdução	1
1.1	Motivação.....	1
1.2	Resumo do trabalho feito	2
2	Estado actual da tecnologia	3
3	Visão geral do sistema	13
4	Antena e recolha de energia	15
4.1	Análise espectral.....	15
4.2	Antena e adaptação de impedâncias.....	21
5	Multiplicadores de tensão.....	25
5.1	Multiplicadores de tensão – Princípio de funcionamento	26
5.2	Multiplicadores de tensão – Principais topologias.....	28
5.3	Multiplicadores de tensão implementados	36
5.3.1	Multiplicador Cockcroft-Walton de 4 níveis – “Multiplicador A”	37
5.3.2	Multiplicador Dickson de 4 níveis – “Multiplicador B”.....	48
5.3.3	Multiplicador Dickson de quatro níveis – “Multiplicador C”	57
5.3.4	Multiplicador Dickson de oito níveis – “Multiplicador D”	64
5.4	Comparação dos diversos multiplicadores implementados	71
5.5	Melhorias a considerar nos multiplicadores	76
6	Reguladores de tensão.....	81
6.1	Reguladores de tensão - topologias.....	82
6.2	Regulador a utilizar no sistema de recolha de energia	88
7	Implementação do sistema	91
7.1	Testes efectuados ao multiplicador	91
7.2	Implementação de um novo multiplicador	95
8	Conclusões e trabalho futuro.....	99
9	Publicações.....	101
10	Bibliografia.....	103

(Esta página foi propositadamente deixada em branco)

Índice de Figuras

Figura 2.1 Relógio Seiko Thermic. Seiko Instruments ©.....	5
Figura 2.2 Sistema de recolha de energia electromagnética: esquema simplificado.....	11
Figura 3.1 Esquema de blocos do sistema de recolha de energia implementado.....	13
Figura 4.1 Varrimento completo do espectro	16
Figura 4.2 Varrimento parcial do espectro (9kHz a 1GHz).....	17
Figura 4.3 Varrimento espectral incluindo o sinal televisivo (400MHz a 600MHz).....	18
Figura 4.4 Espectro electromagnético dos canais televisivos.....	20
Figura 4.5 Antena utilizada	21
Figura 5.1 Princípio de funcionamento de um duplicador de tensão	26
Figura 5.2 Duplicador de tensão	27
Figura 5.3 Multiplicador de tensão Cockcroft-Walton.....	28
Figura 5.4 Multiplicador Cockcroft-Walton de 4 níveis	30
Figura 5.5 Multiplicador de tensão de Dickson	30
Figura 5.6 Multiplicador de tensão de Dickson com quatro níveis	32
Figura 5.7 Multiplicador Dickson de dois níveis	32
Figura 5.8 Ciclos de operação do multiplicador de Dickson	33
Figura 5.9 Multiplicador CW de 4 níveis	34
Figura 5.10 Multiplicador A: circuito implementado	37
Figura 5.11 Multiplicador A: circuito simulado	37
Figura 5.12 Multiplicador A: onda de saída	40
Figura 5.13 Multiplicador A: pormenor da onda de saída.....	40
Figura 5.14 Multiplicador A: comparação de resultados	45
Figura 5.15 Multiplicador A: comparação das tensões de ondulação	47
Figura 5.16 Multiplicador B: implementação.....	48
Figura 5.17 Multiplicador B: simulação.....	48
Figura 5.18 Multiplicador B: onda de saída	51
Figura 5.19 Multiplicador B: pormenor da onda de saída	51
Figura 5.20 Multiplicador B: comparação de resultados	54
Figura 5.21 Multiplicador B: comparação das tensões de ondulação	56
Figura 5.22 Multiplicador C: implementação.....	57
Figura 5.23 Multiplicador C: simulação.....	57
Figura 5.24 Multiplicador C: onda de saída	59
Figura 5.25 Multiplicador C: pormenor da onda de saída	59
Figura 5.26 Multiplicador C: comparação de resultados	61
Figura 5.27 Multiplicador C: tensões de ondulação.....	63

Figura 5.28 Multiplicador D: implementação.....	64
Figura 5.29 Multiplicador D: circuito eléctrico para simulação	64
Figura 5.30 Multiplicador D: onda de saída	66
Figura 5.31 Multiplicador D: pormenor da onda de saída.....	66
Figura 5.32 Multiplicador D: comparação dos resultados obtidos.....	68
Figura 5.33 Multiplicador D: tensões de ondulação	70
Figura 5.34 Comparação da tensão de saída dos multiplicadores ($V_{in} = 0.5V$)	73
Figura 5.35 Comparação das eficiências dos multiplicadores	74
Figura 5.36 Caso 1: circuito multiplicador	79
Figura 5.37 Caso 2: circuito multiplicador	79
Figura 6.1 Princípio de funcionamento de um regulador linear	83
Figura 6.2 Tensão de referência obtida com díodo zener.....	83
Figura 6.3 Obtenção de VREF, através do díodo Zener com corrente constante	84
Figura 6.4 Regulador com díodo Zener.....	85
Figura 6.5 Reguladores com comutação: topologias básicas.....	87
Figura 7.1 Multiplicador D: circuito eléctrico com carga aplicada.....	91
Figura 7.2 Multiplicador D: testes com carga.....	93
Figura 7.3 Sinal de saída do multiplicador D, em vazio.....	94
Figura 7.4 Multiplicador E: circuito eléctrico	95
Figura 7.5 Multiplicador E: circuito implementado.....	95
Figura 7.6 Multiplicador E: testes com um LED como carga	96
Figura 7.7 Antena com multiplicador E: montagem experimental	97
Figura 7.8 Sinal de saída do multiplicador E, em vazio.	97

Índice de tabelas

Tabela 4.1 Principais características da antena utilizada.....	21
Tabela 5.1 Multiplicador A: resultados da simulação	39
Tabela 5.2 Multiplicador A: resultados da implementação	42
Tabela 5.3 Multiplicador B: resultados da simulação	50
Tabela 5.4 Multiplicador B: resultados da implementação	52
Tabela 5.5. Multiplicador C: resultados da simulação	58
Tabela 5.6 Multiplicador C: resultados da implementação	60
Tabela 5.7. Multiplicador D: resultados da simulação	65
Tabela 5.8 Multiplicador D: resultados da implementação	67
Tabela 5.9 Comparação dos resultados obtidos	79
Tabela 7.1 Resultados do multiplicador com carga aplicada.....	92

(Esta página foi propositadamente deixada em branco)

Lista de Acrónimos

ANACOM – Autoridade Nacional de Comunicações

DC – Corrente Contínua (Direct Current)

FM – Modulação de Frequência (Frequency Modulation)

GSM – Sistema Global para comunicações Móveis (Groupe Special Mobile)

ISM – banda de rádio Industrial, Científica e Médica

LCD – Ecrã de Cristais Líquidos (Liquid Crystal Display)

PAR – Potência Aparente Radiada

RBW – Largura de Banda de Resolução (Resolution Bandwidth)

RF – Radiofrequência

WSN – Redes de Sensores Sem Fios (Wireless Sensor Network)

UHF – Frequência Ultra Alta (Ultra High Frequency)

UMTS – Universal Mobile Telecommunication System

(Esta página foi propositadamente deixada em branco)

1 Introdução

1.1 Motivação

Como aluno finalista do Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores surgiu a oportunidade de fazer a minha Dissertação de Mestrado num tema relacionado com a “recolha de energia do ambiente”. A dependência de combustíveis fósseis tem levado a comunidade científica a conduzir uma linha de investigação no sentido de se encontrarem fontes de energia renováveis. Uma das abordagens que actualmente tem concentrado grandes esforços e investigação tem a designação de “recolha de energia do ambiente”. Esta tecnologia consiste em utilizar fontes existentes no meio ambiente para se obter energia eléctrica, que poderá ser utilizada para armazenamento ou alimentação de circuitos electrónicos de baixa potência. Apesar de se conseguirem recolher apenas pequenas quantidades de energia, o constante avanço da electrónica, nomeadamente ao nível do consumo e eficiência, permite que diversos circuitos electrónicos sejam alimentados recorrendo à recolha de energia do ambiente. Além disso, trata-se de uma fonte de energia limpa, que poderá substituir em diversos casos o uso de baterias, resolvendo assim diversos problemas ambientais associados à utilização destas fontes de alimentação que actualmente são amplamente utilizadas.

Dadas as potencialidades desta tecnologia, que poderá abrir caminho para uma utilização mais racional da energia sem recurso a materiais nocivos para o meio ambiente, assim como os baixos custos económicos associados, optei por este tema, de forma a também eu poder dar o meu contributo à investigação em curso nesta área científica.

1.2 Resumo do trabalho feito

A recolha de energia do ambiente pode ser feita recorrendo a diversos tipos de fontes. Com a utilização de conversores adequados é possível recolher energia eléctrica a partir da conversão de energia mecânica, solar, eólica, electromagnética, entre outras. De entre as diversas fontes de energia disponíveis, neste trabalho decidiu abordar-se a recolha de energia de fontes electromagnéticas, mais especificamente de fontes de ondas de radiofrequência. Note-se que a recolha de energia de fontes solares também é considerada como recolha de energia electromagnética.

Para poder efectuar a recolha de energia foi efectuado um estudo do espectro electromagnético, para avaliar quais as melhores fontes. Escolhidas as fontes que garantem maiores quantidades de energia, e menor complexidade de implementação, foi simulado e implementado um sistema de recolha de energia electromagnética do ambiente, cujos resultados se apresentam. Foram ainda simuladas diversas alterações a esse mesmo sistema, de forma a poder aumentar o rendimento da conversão de energia electromagnética numa tensão continua. Estas simulações serão também apresentadas, e seguir-se-ão algumas conclusões acerca da utilidade actual deste meio de alimentar circuitos. Através do estudo cuidadoso dos diversos circuitos constituintes do sistema de recolha de energia foi possível chegar a diversas conclusões acerca do funcionamento dos mesmos e da sua importância no sistema global. Será ainda revisto o que actualmente se conhece sobre a área, assim como os resultados que se têm obtido. Neste capítulo apresenta-se ainda uma comparação entre os diferentes tipos de recolha de energia do ambiente e as quantidades de energia que actualmente se conseguem recolher, assim como as previsões para o futuro da recolha de energia do ambiente.

2 Estado actual da tecnologia

Ao longo das últimas duas décadas, o número de dispositivos móveis existentes no mundo aumentou exponencialmente. O constante avanço da tecnologia permitiu que o preço dos dispositivos móveis (que incluem telefones móveis, sensores para diversas aplicações, computadores portáteis, etc.) baixasse substancialmente, sendo estes dispositivos acessíveis a grande parte da população mundial. Além disso, o avanço da tecnologia referente aos circuitos integrados, onde ainda se continua a aplicar a conhecida Lei de Moore (duplicação do número de transístores na mesma área de silício a cada 18 meses) permite, além dos baixos preços, a colocação de grandes capacidades de processamento em dispositivos muito simples e de reduzidas dimensões, tornando-os assim bastante apelativos. Juntando o baixo preço à grande capacidade de processamento, facilmente se deu uma grande explosão do número destes dispositivos.

O aumento dos dispositivos móveis e a necessidade contínua de alimentação eléctrica destes dispositivos levou também a um aumento enorme do número de baterias recarregáveis existentes no mercado [1]. As baterias são alvo de grande investigação científica, e estão a ser constantemente melhoradas. No entanto, actualmente pode dizer-se que as baterias, fundamentais à portabilidade dos equipamentos, estão também associadas à limitação dessa mesma portabilidade. O recarregamento necessário das baterias e por vezes o seu tempo de vida útil, que consiste em algumas centenas de ciclos de carga e descarga, limitam a expansibilidade de alguns dispositivos móveis. A estas baterias estão assim associados diversos problemas que se podem sintetizar em dois tipos:

- Problemas associados ao necessário recarregamento das baterias, em termos de custos económicos e facilidade do processo de recarregamento;
- Problemas relacionados com a produção e com a deposição destas baterias quando atingido o seu tempo de vida útil, que englobam as grandes quantidades de energia necessárias à produção das baterias e a necessidade de criação de formas de depósito e reutilização dos materiais constituintes das baterias, que são geralmente, materiais nocivos para o meio ambiente.

Além dos problemas atrás enunciados existem aplicações onde a utilização de baterias é demasiado dispendiosa. Se em certos dispositivos o utilizador tem a possibilidade de recarregar facilmente a bateria quando necessário, em certas aplicações que se desejam autónomas, o processo de recarregar as baterias é muito mais complexo. É o caso das redes de sensores sem fios (“Wireless Sensor Networks” - WSN) [2]. Nos últimos anos tem havido um crescimento acentuado das WSN existentes, assim como do desejo de se construírem novas WSN, que têm o

mais diverso tipo de aplicações. Em muitas destas aplicações existem nós (sensores) da rede que se deseja que sejam colocados em locais remotos ou de difícil acesso e, portanto, com pouca necessidade de intervenção de um operador humano. A utilização de baterias nestes sensores limita seriamente a expansão deste tipo de redes devido aos custos associados à manutenção e recarregamento destas baterias nos sensores de mais difícil acesso.

Desta forma, empresas e comunidade científica têm fixado grande atenção e esforços no sentido de se poderem encontrar alternativas para a alimentação tanto dos sensores das redes sem fios, como de outros dispositivos móveis. Mais uma vez, é importante referir os problemas ambientais associados às baterias e a pressão que existe a nível mundial para se resolverem esses problemas. No caso dos circuitos eléctricos de baixa potência (de baixo consumo), como é o caso dos sensores atrás falados, uma das formas encontradas para alimentar estes circuitos sem grandes custos para o utilizador é através da utilização de uma tecnologia a que se tem denominado de “Recolha de Energia do Ambiente” (“Power/Energy Harvesting”) [3]. Existem diversas fontes de energia no ambiente, às quais se poderá recorrer para obter energia de uma forma gratuita. De entre todas as fontes possíveis, as que actualmente mais se destacam, quer pela densidade de energia que é possível obter, quer pela facilidade com que se consegue obter essa energia são:

- Mecânica;
- Eólica;
- Electromagnéticas (Solar e Radiofrequência);
- Térmica;
- Química;
- Atómica;

É de notar que o interesse nestes tipos de fontes de energia no ambiente não é meramente académico/científico, sendo que muitas empresas já possuem aplicações comerciais de recolha de energia dos diversos tipos de fontes aqui enumerados.

Apesar de este trabalho se centrar na recolha de energia do ambiente utilizando fontes electromagnéticas, também denominada de recolha de energia electromagnética do ambiente, considera-se oportuno e adequado referir as principais características das outras formas de recolha de energia do ambiente, isto é, da recolha de energia do ambiente utilizando os restantes tipos de fontes atrás mencionados.

A energia solar e a energia eólica são recolhidas através do recurso a dispositivos miniaturizados, mas em tudo semelhantes aos existentes nos grandes parques solares e eólicos. Estes tipos de recolha de energia do ambiente utilizam tecnologia já amplamente conhecida e

utilizada e a sua principal desvantagem centra-se no facto de não se conseguirem atingir grandes rendimentos na conversão da energia desde a sua recolha na fonte até à disponibilização dessa mesma energia para alimentação de circuitos eléctricos. É de notar que, por exemplo no caso da energia eólica, o máximo rendimento teórico que se consegue obter é de apenas 59,26%. A este valor de rendimento é ainda necessário retirar todas as perdas associadas ao processo de recolha e conversão da energia, atingindo-se portanto rendimentos relativamente baixos. O estado actual da tecnologia, no que se refere ao desenvolvimento de células solares, também não permite rendimentos elevados. Existem já diversos dispositivos que funcionam com base neste tipo de recolha de energia do ambiente, como por exemplo o teclado “Logitech K750”[4]. Este teclado funciona recolhendo energia solar do ambiente, e segundo os seus fabricantes, poderá acumular internamente energia para três meses de funcionamento em completa escuridão.

A recolha de energia térmica do ambiente tem como base uma lei fundamental da termodinâmica, designada por Ciclo de Carnot. Actualmente existem diversos dispositivos com aplicação comercial que funcionam com base na recolha deste tipo de energia, como por exemplo relógios [1]. A figura 2.1, apresentada em seguida, demonstra o funcionamento de um relógio com base na recolha de energia térmica.

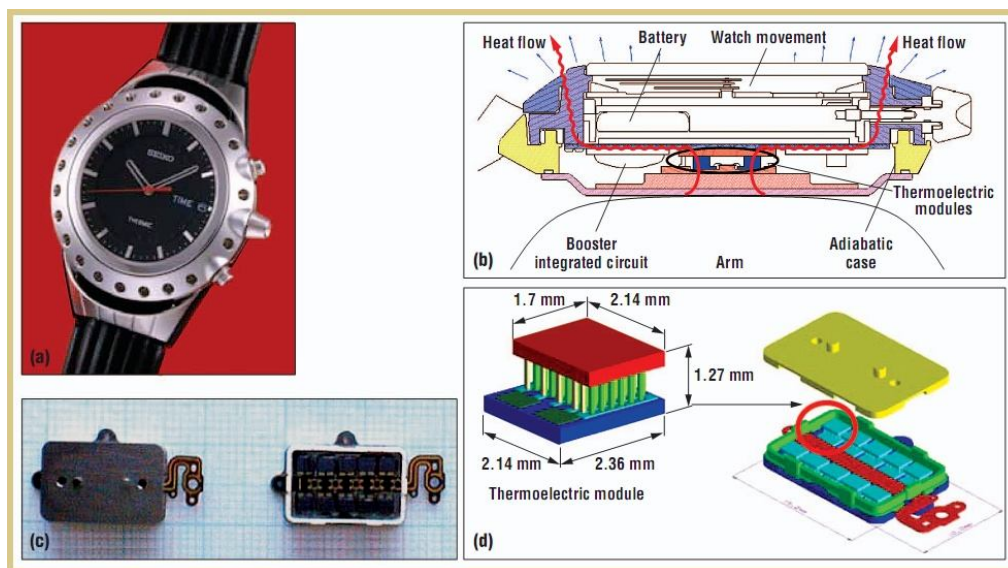


Figura 2.1 Relógio Seiko Thermic. a) Vista do relógio; b) Esquema seccional; c) módulos termoelectrónicos; d) pormenor da pilha térmica. Seiko Instruments ©.

Através do Ciclo de Carnot, e tendo em conta a diferença térmica entre a pele humana e o ar em redor, é possível ser executado um ciclo térmico no relógio, acumulando energia suficiente para o seu funcionamento. Trata-se portanto de um relógio alimentado exclusivamente por energia termodinâmica.

A energia dissipada por fontes vibratórias é recolhida recorrendo a materiais piezoeléctricos [1]. É de notar que existem outras formas de captar energia de fontes vibratórias, através da utilização de diversas tecnologias que, no entanto, não serão aqui abordadas. Muito sucintamente, um material piezoeléctrico é um material que quando sujeito a uma pressão mecânica gera um campo eléctrico. Como por definição a tensão eléctrica é o integral de linha do campo eléctrico, então os materiais piezoeléctricos podem gerar tensões eléctricas. Este processo é reversível e, portanto, aplicando uma tensão eléctrica ao material é possível deformá-lo. Esta característica muito particular de alguns materiais como o quartzo, turmalina ou sal de Rochelle foi descoberta pelos irmãos Pierre e Jacques Curie. Aplicando uma tensão alternada sinusoidal ao material piezoeléctrico este vai vibrar. Esta vibração é dependente da frequência do sinal aplicado ao material e é máxima para uma frequência igual à frequência de ressonância do material. Devido a esta característica, os materiais piezoeléctricos são então utilizados para a recolha de energia de fontes vibratórias do ambiente, aproveitando a frequência de ressonância do material utilizado para maximizar a quantidade de energia recolhida. Estão disponíveis comercialmente diversos conversores de energia piezoeléctrica e este tipo de recolha de energia do ambiente é aquele onde actualmente se centram as maiores atenções da comunidade científica dadas as suas capacidades de geração de quantidades de energia razoáveis e grande diversidade de fontes. Uma das formas actualmente mais abordadas, e cujos resultados se apresentam mais apelativos, é a recolha de energia piezoeléctrica recorrendo ao ser humano, mais especificamente aos diversos movimentos que o ser humano efectua de forma natural. Diversos estudos indicam que o simples processo de andar pode gerar uma potência mecânica cujo valor vai até 67 W [5]. Tendo em conta as diversas perdas mecânicas e o rendimento dos sistemas de recolha de energia, pode ser aproveitada uma potência máxima de 1.265 W, dos 67 W dispendidos. Este valor é superior ao valor de potência que se consegue obter em qualquer dos actuais sistemas de recolha de energia, tratando-se de um máximo teórico. No entanto, espera-se que se consiga chegar a cerca de 1W de potência recolhida. Em [6] podem ser observados diversos geradores de energia eléctrica, que não mais fazem que converter a energia dispendida pelo ser humano, nas suas diversas actividades, em energia eléctrica, recorrendo a materiais piezoeléctricos. Uma aplicação muito óbvia para este tipo de conversores de energia é a sua utilização em sapatos utilizados pelo ser humano. Em [1] pode ver-se o exemplo de um sistema de recolha de energia, através da colocação de um conversor piezoeléctrico na sola de um sapato de desporto cujos resultados se apresentam como bastante promissores. Além destes exemplos aqui mostrados, existem já diversos dispositivos comerciais que possibilitam a recolha de energia recorrendo a materiais piezoeléctricos, tanto dos movimentos do ser humano como de outras aplicações. É usual ver, por exemplo, mochilas cujas alças têm na sua constituição um material piezoeléctrico, que permite a acumulação de energia. A energia acumulada tende a ser suficiente para recarregar pequenos dispositivos móveis, como leitores de

música portáteis. A recolha de energia do ambiente recorrendo a materiais piezoeléctricos é uma das formas mais promissoras de recolha de energia do ambiente, sendo na actualidade aquela onde mais se centra a investigação científica e aquela que apresenta melhores resultados, no que toca à quantidade de energia recolhida.

A recolha de energia química e atómica do ambiente tem como base as reacções químicas que ocorrem entre os elementos. Quando se dá uma reacção química, por exemplo de acção-redução, os elementos libertam energia. Através de processos relativamente complexos é possível recolher alguma desta energia, tornando assim possível a recolha e utilização da energia. É de notar obviamente a diferença entre este tipo de recolha de energia e o funcionamento das próprias baterias (de chumbo ou lítio) que envolve reacções químicas. No caso da recolha de energia química do ambiente não se provocam reacções químicas com o objectivo de recolher daí energia, como nas baterias. Ao invés disso, tenta recolher-se energia das reacções químicas que naturalmente ocorrem no meio ambiente.

Enunciadas as principais características dos diversos tipos de recolha de energia do ambiente menos focados neste documento, segue-se então uma explicação do princípio de funcionamento da recolha de energia electromagnética do ambiente, e do estado actual da tecnologia neste tipo de recolha de energia do ambiente. Na actualidade existem inúmeras fontes de energia electromagnética que emitem para o ar quantidades bastante elevadas de radiação electromagnética. Estações emissoras de televisão, rádio (profissional e amador) e bases transmissoras de sinal GSM/UMTS (telefonía móvel) existem em grande quantidade em todas as cidades do mundo, de forma que o globo terrestre (ou pelo menos a parte habitada), está coberto por ruído electromagnético proveniente destas fontes. Estas estações emissoras têm a particularidade de serem estações de difusão, isto é, muita da energia por elas emitida não é aproveitada, não é captada pelos receptores específicos de cada tipo de sinal (televisão, rádio ou GSM/UMTS), acabando por se perder. É então possível e desejável que se consiga obter alguma desta energia para alimentação de circuitos eléctricos. É necessário ter em atenção que a existência de sistemas de recolha de energia electromagnética do ambiente não poderá deteriorar as condições de funcionamento dos dispositivos tradicionalmente receptores desta mesma radiação electromagnética. Só desta forma os sistemas de recolha de energia electromagnética poderão ser utilizados. Quando comparada com a recolha de energia solar ou eólica, que são muito instáveis ao depender directamente do nível de luz solar ou velocidade do vento em cada instante, a recolha de energia electromagnética do ambiente é muito estável, pois as fontes emitem quase continuamente.

Como é plenamente conhecido e aceite, a potência do sinal que é recebida por um dispositivo ao alcance de uma certa estação emissora de radiação electromagnética é dada pela

Fórmula de Friis, também conhecida como Lei Fundamental das Telecomunicações, enunciada em seguida.

$$\frac{P_r}{P_t} = \left(\frac{\lambda}{2\pi d}\right)^2 * G_r * G_t \quad (2.1)$$

Na equação 2.1, aqui enunciada, P_r e G_r representam a potência e ganho da antena receptora, P_t e G_t representam a potência e ganho da antena transmissora, d representa a distância entre as antenas e λ representa o comprimento de onda do sinal emitido.

A equação 2.1 assume condições óptimas de transmissão, isto é, assume que as antenas são isotrópicas sem perdas e que a transmissão é efectuada sem perdas. Mesmo considerando estas condições óptimas de funcionamento, já se pode verificar que a potência recebida pelo equipamento receptor depende inversamente do quadrado da distância, pelo que se receberá sempre uma potência inferior àquela emitida pela antena transmissora. Em condições reais de funcionamento, os níveis de potência recebidos por um dispositivo ligado a uma estação emissora são obviamente mais baixos, devido à existência de perdas dos seguintes tipos:

- Perdas de polarização das antenas;
- Perdas na adaptação de impedâncias;
- Perdas de propagação do sinal.

A fórmula de Friis pode então ser estendida, para englobar três coeficientes que caracterizam os três tipos de perdas. A fórmula completa apresenta-se de seguida.

$$\frac{P_r}{P_t} = \left(\frac{\lambda}{2\pi d}\right)^2 * G_r * G_t * C_p * C_z * C_r \quad (2.2)$$

Onde C_p representa as perdas resultantes de uma polarização imperfeita das antenas emissora e receptora, C_z representa as perdas decorrentes de uma adaptação de impedâncias imperfeita e C_r representa as perdas de propagação decorrentes da propagação do sinal. Estes três coeficientes estão contidos entre zero e um.

Enquanto os dois primeiros tipos de perdas aqui referidos possuem nomes auto-explicativos, é importante referir alguns aspectos sobre as perdas de propagação. Estas perdas resultam da ocorrência de diversos fenómenos que englobam atenuações devido a factores meteorológicos e atmosféricos e atenuações devido a fenómenos da própria propagação, como a reflexão e difracção do sinal, que levam à existência de múltiplos caminhos entre o emissor e o receptor. Este fenómeno é conhecido na literatura como “multipath”. Este fenómeno da existência de múltiplos caminhos é um problema bastante sério nas telecomunicações, dado que afecta gravemente a qualidade do sinal recebido, isto é, a ordem e qualidade com que os dados

emitidos chegam ao receptor. Com a existência do fenómeno de “multipath” aparece uma atenuação do sinal, conhecido como “fading”. Mesmo na recolha de energia do ambiente, é preciso ter em conta este fenómeno, pois a quantidade de sinal que chega ao sistema de recolha pode ser significativamente mais baixa que num caso de transmissão ideal.

Como se observa ainda na Fórmula de Friis e como já foi referido, a potência no receptor decai com o quadrado da distância ao emissor, pelo que é possível que os níveis de energia electromagnética recuperada do ambiente tenham valores algo díspares, dependendo da distância ao emissor. Dependendo das aplicações, poderá ser possível colocar o receptor mais perto do emissor, aumentando assim o valor da potência recebida. Há que ter ainda em conta o tipo de estação emissora à qual se vai querer captar energia, tendo em conta que as frequências das diversas fontes são bastante diferentes. Todos estes factores são bastante limitativos do nível de energia electromagnética que se consegue recolher do ambiente, não se ultrapassando actualmente o valor de algumas centenas de μW . Actualmente os principais sistemas de recolha de energia electromagnética do ambiente existentes na literatura utilizam como principais fontes de energia os seguintes tipos de estações emissoras de sinal de radiofrequência (RF):

- Televisão Analógica e Digital (banda de 200 MHz até 800 MHz)
- Telefonía Móvel (GSM nos 900 MHz e 1800MHz);
- Banda ISM nos 2,4 GHz;
- Microondas (até 18 GHz).

O número de fontes para recolha de energia electromagnética poderá aumentar consideravelmente, uma vez que diversos especialistas já estudam a possibilidade de recolher energia de fontes cuja frequência vai até aos 60 GHz [7].

Em [8] é implementado um sistema que consegue recolher $60 \mu\text{W}$ a 4.1 km de distância de uma estação emissora de sinal televisivo (674MHz até 860MHz). A energia captada é suficiente para alimentar um termómetro e sensor de humidade com um LCD incorporado. Este dispositivo é normalmente alimentado através do recurso a uma bateria AAA de 1.5 V. No entanto, como se pode verificar em [3], mesmo as estações emissoras de televisão têm curtos períodos diários em que cortam a emissão de sinal, para manutenção do sistema de emissão. Semanalmente existe um período de manutenção um pouco mais alargado do que os períodos diários. Isto significa que apesar da grande estabilidade que as redes de difusão de sinal televisivo têm, só por si não conseguem assegurar uma alimentação contínua a um dispositivo ligado a um sistema de recolha de energia electromagnética do ambiente que utilize esta fonte. Este problema pode ser facilmente ultrapassado se, ao invés de se alimentar directamente o

dispositivo, se utilizar uma forma intermédia de armazenamento da energia, por exemplo recorrendo a super-condensadores.

Existindo este problema da descontinuidade da emissão nas estações de difusão de sinal televisivo, alguns sistemas recolhem energia electromagnética do ambiente recorrendo a fontes GSM. As estações emissoras de sinal GSM, numa situação normal de funcionamento, emitem continuamente, sendo portanto uma fonte fiável de energia. No entanto, as antenas emissoras de GSM emitem quantidades de energia muito inferiores àquelas emitidas pelas antenas televisivas pelo que os sistemas de recolha de energia electromagnética só funcionarão se estiverem colocados perto das antenas emissoras. Este facto pode não constituir um problema, dado que a menor quantidade de energia libertada no GSM é compensada pelo aumento muito grande do número de antenas existentes. Além disso, a penetração do sinal GSM em Portugal, por exemplo, é de cerca de 99% do território nacional, segundo dados da ANACOM. Isto permite a recolha de energia RF do ambiente, recorrendo a este tipo de fontes em qualquer parte do território nacional. Isto pode obviamente extrapolar-se para a maior parte dos países desenvolvidos, onde a cobertura de sinal GSM é praticamente total. Em [9] pode ver-se um sistema de recolha de energia electromagnética do ambiente que utiliza como fonte a banda GSM nos 900MHz. É perfeitamente visível que a distância à antena emissora é muito inferior quando comparada com a distância de recolha de energia utilizando fontes de sinal televisivo, nos casos aqui descritos (50 m e 4.1 km, respectivamente).

Em aplicações mais específicas pode ainda recolher-se energia electromagnética de frequências maiores, como a banda ISM dos 2.4 GHz. Em [10], um sistema de recolha de energia foi implementado para funcionar nesta gama de frequências. Neste caso é perfeitamente visível que o sistema só poderá funcionar quando colocado bastante próximo (na ordem da dezena de centímetro) da fonte de energia. As fontes mais comuns nesta gama de frequências são os emissores de sinal wifi (IEEE 802.11), sinal das redes locais sem fios.

Nos sistemas de recolha de energia electromagnética do ambiente é fundamental ter em consideração a correcta implementação do sistema, de forma a minimizar as perdas, que dados os baixos níveis de potência envolvidos poderão ser incomportáveis. Em [11] é projectado um sistema de recolha de energia que consegue extrair do ambiente 0.1 μ W. Apesar de se tratar de um nível de potência muito baixo, este valor já é suficiente para alimentar ou carregar alguns circuitos. No entanto, o fundamental a reter aqui é que com valores de pico espectrais de apenas -20 dBm já é possível efectuar recolha de energia do ambiente, desde que o sistema esteja bem projectado e implementado. Neste caso específico, pode ainda observar-se que se atinge um rendimento na conversão de energia RF para uma tensão DC de 13%.

Todos os sistemas até aqui descritos têm a particularidade de funcionar com base num mesmo pressuposto. Recolher energia recorrendo a sinal de uma determinada frequência. Isto acontece porque todos estes sistemas funcionam com base no seguinte esquema simplificado.

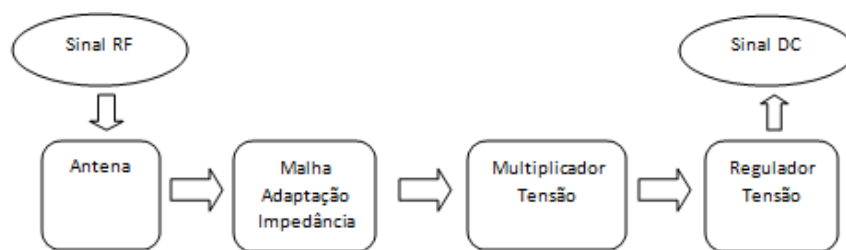


Figura 2.2 Sistema de recolha de energia electromagnética: esquema simplificado

Estes sistemas são muitas vezes designados na literatura por “rectennas”, dada a sua potencialidade de recolha de energia de radiofrequência (RF) e conversão dessa energia numa tensão contínua (DC).

A presença da antena e da malha de adaptação de impedâncias no sistema é bastante clara. A utilização de multiplicadores de tensão deve-se à necessidade de elevar o valor da tensão a um nível desejado. Como a cada instante o valor de saída do sistema (o valor da tensão contínua) é proporcional ao valor de energia de radiofrequência que o sistema está a recolher, torna-se necessária a utilização de um regulador de tensão, para garantir a estabilidade necessária na saída do sistema. Mais à frente neste documento, nos capítulos respectivos, os diversos componentes do sistema serão analisados de forma mais cuidada.

O motivo de se utilizar apenas uma determinada frequência (ou uma banda de frequências estreita) para recolha da energia é a utilização de uma malha da adaptação de impedâncias, que é obviamente projectada para uma determinada frequência. Para uma malha de adaptação de impedâncias ter um factor de qualidade suficientemente elevado, o que garante uma boa adaptação de impedâncias, a frequência de funcionamento do sistema no qual está inserido essa malha, não se deve afastar mais de 10% do valor de frequência para o qual a malha foi criada. Assim, um sistema cuja malha tiver sido projectada para 2.4 GHz, por exemplo, deverá funcionar entre 2.16 GHz e 2.64 GHz. Fora desta gama de frequências a adaptação não está a ser correctamente feita e, portanto, o sistema não funcionará como suposto, isto é, não estará a funcionar no rendimento máximo. Este facto limita portanto a largura de banda em que os sistemas de recolha de energia do ambiente funcionam. É no entanto possível criar sistemas mais completos, que operam em diversas frequências. Em [12] foi simulado e implementado um sistema de recolha de energia electromagnética do ambiente mais completo que os anteriores, pois através da existência de algum controlo é possível escolher a frequência de funcionamento. O sistema está projectado para funcionar a diversas frequências e a cada momento recolhe

energia da fonte cujo sinal lhe estiver a chegar com maior intensidade. A desvantagem deste sistema face aos anteriores é que necessita obviamente de diversas malhas de adaptação, assim como de diversas antenas e detectores de radiofrequência, além de toda a lógica de controlo, sendo portanto um sistema bastante mais complexo que os anteriores. É de notar que, no entanto, se poderá utilizar aqui apenas uma única antena de largo espectro, à custa da perda de algum ganho desta mesma antena, em comparação com o ganho das múltiplas antenas de espectro mais reduzido. Porém, tenha-se em conta que apesar do sistema poder funcionar em diversas frequências, em cada instante apenas se recolhe energia de uma determinada frequência, pelo que se verifica que, mesmo utilizando este tipo de sistema, não se aproveita na realidade toda a energia presente no espectro electromagnético, nas diversas frequências. Em [7] investigadores da “Georgia Tech” afirmam estar a desenvolver uma antena de largo espectro, que permitirá recolher energia desde os 100MHz até pelo menos 15GHz. Um desenvolvimento deste tipo poderá ser uma grande impulsão na recolha de energia electromagnética do ambiente, pois a grande desvantagem deste tipo de recolha de energia é exactamente o facto de não se poderem utilizar, em simultâneo, fontes de energia de frequências diferentes.

Considerando o estado actual da tecnologia, é possível recolher algumas centenas de μW através da utilização de um sistema de recolha de energia do ambiente. No entanto, considerando sistemas mais complexos, que poderão englobar a recolha de energia de diversas fontes (por exemplo combinar a recolha de energia de fontes electromagnéticas e mecânicas), poderá ser possível recolher quantidades de energia superiores, pelo menos na ordem das dezenas de mW.

Dados os exemplos anteriores, representativos do estado actual da tecnologia, é perfeitamente visível que dada a constante evolução dos circuitos electrónicos, que cada vez necessitam de uma menor quantidade de energia para poderem funcionar, a recolha de energia electromagnética do ambiente pode ser utilizada como fonte de alimentação destes mesmos circuitos. Isto torna possíveis projectos de grandes redes de sensores sem fios cujo campo de aplicação poderá ser enorme. Além disso, a utilização de fontes de energia limpa poderá ser um passo inicial para resolver os diversos problemas ambientais associados ao uso de baterias. O estado actual da tecnologia não permite ainda efectuar grandes previsões, mas a recolha de energia do ambiente, dadas as suas potencialidades (que incluem fácil utilização e muito baixo custo económico), poderá ser, no futuro, uma das formas de alimentação de circuitos mais utilizada. Para isto também contribui obviamente a constante evolução da electrónica, principalmente das tecnologias de micro electrónica, que possibilitam já actualmente ter circuitos integrados de grande complexidade em áreas muito reduzidas e com consumos muito baixos.

3 Visão geral do sistema

O sistema desenvolvido e aqui apresentado é baseado nos sistemas já existentes para recolha de energia electromagnética do ambiente, esquematizados na figura 2.2 deste documento. No entanto, é necessário salvaguardar algumas diferenças em relação aos restantes sistemas presentes na literatura.

A figura 3.1, apresentada de seguida, contém um esquema de blocos bastante simplificado do sistema de recolha de energia electromagnética do ambiente desenvolvido neste trabalho.

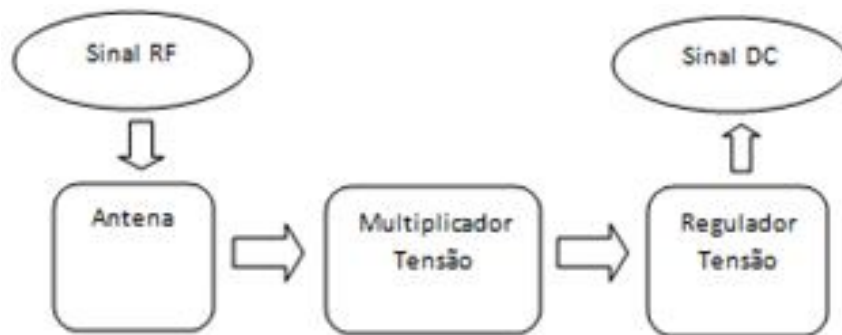


Figura 3.1 Esquema de blocos do sistema de recolha de energia implementado

Como se pode verificar, são notórias as diferenças em relação ao esquema da figura 2.2, nomeadamente a não existência de uma malha de adaptação de impedâncias. Após a análise do espectro electromagnético, foi escolhida como fonte de sinal RF uma estação emissora de sinal televisivo cujas frequências de operação se situam entre os 450MHz e os 550MHz. Dadas as frequências envolvidas, optou-se pela não utilização de uma malha de adaptação. A justificação deste facto será apresentada no capítulo respectivo.

De uma forma geral, o funcionamento do sistema assenta com base nos seguintes aspectos: através da utilização de uma antena é recolhida a energia RF presente no ambiente em redor do sistema. A antena escolhida para a recolha de energia deve ser capaz de recolher energia das frequências desejadas, tendo um valor de ganho o mais elevado possível. A energia recolhida pela antena será depois transmitida para um multiplicador de tensão, uma vez que o nível de tensão da energia recolhida é demasiado baixo para a utilidade do sistema. O multiplicador implementado deverá ser capaz de elevar o valor de tensão até um valor considerado aceitável, para que quando se aplique esse valor ao regulador se consiga ter na saída do sistema completo (à saída do regulador) uma tensão de 1.2 V. A não existência de uma malha de adaptação de impedâncias origina algumas perdas que deverão ser minimizadas, como se verá. Como o valor de tensão à saída do multiplicador depende, em cada instante, da

quantidade de energia RF que está a chegar à antena, torna-se imperativa a utilização de um regulador de tensão para assegurar que a saída do sistema está sempre no nível desejado. O regulador de tensão não poderá ser linear devido às características dissipativas destes reguladores como se verá no capítulo correspondente (capítulo 6). Apesar de não ser aqui considerada a carga do sistema, isto é, o dispositivo que o sistema estará a alimentar (ou carregar), serão ilustrados alguns exemplos de dispositivos que deverão funcionar alimentados por este sistema.

Tratando-se de um sistema de recolha de energia do ambiente, onde os valores de potência eléctrica que se conseguem obter são relativamente baixos, como se pode verificar pelo estado actual da tecnologia, será necessário ter diversos cuidados para minimizar as perdas nos diversos blocos constituintes do sistema. O bloco multiplicador de tensão é um bloco fundamental, que condiciona fortemente o funcionamento do sistema e como tal será o bloco onde se centrarão maiores atenções. É necessário garantir que o multiplicador funciona às frequências desejadas, minimizando as perdas, uma vez que será neste bloco e na ligação entre a antena e este bloco que estará a origem da maior parte das perdas do sistema.

Todos os componentes constituintes do sistema de recolha de energia serão apresentados nos próximos capítulos deste documento, onde se incluem as simulações, implementações e, a existir, alterações propostas a cada um dos desses blocos constituintes.

A construção modular do sistema garante uma melhor adaptabilidade. Caso se alterem as condições de funcionamento do sistema, por exemplo se a maior quantidade de energia disponível justificar uma alteração da fonte de energia electromagnética, apenas será necessário alterar um dos blocos do sistema, neste caso a antena, conseguindo assim garantir-se o correcto funcionamento deste. Além disso, com este tipo de construção, é relativamente fácil adicionar novos blocos de funcionamento, por exemplo um bloco de adaptação de impedâncias, que poderá ser essencial ao correcto funcionamento do sistema em determinadas frequências. Apesar desta modularidade, é obviamente necessário ter em conta os limites de funcionamento dos diversos blocos.

Em suma, o sistema de recolha de energia aqui apresentado deverá ser capaz de recolher energia do ambiente suficiente para garantir na saída do sistema uma tensão de 1.2 V e um valor de corrente mínimo que seja suficiente para a carga aplicada ao sistema. Como objectivo principal defina-se um valor aceitável de corrente de 1 mA, o que levaria a que o sistema conseguisse recolher do ambiente uma potência de 1.2 mW. Este valor é razoavelmente superior aos valores de potência conseguidos em sistemas semelhantes, pelo que poderá não ser atingido, mas numa primeira fase, tome-se este valor como uma referência.

4 Antena e recolha de energia

O primeiro bloco do sistema de recolha de energia implementado e esquematizado na figura 3.1 deste documento é a antena, utilizada para recolha da energia RF presente nas proximidades. Para a correcta escolha da antena será necessário avaliar o espectro electromagnético, de forma a poder extrair energia das fontes que se apresentem como melhores alternativas, isto é, das fontes que estejam a radiar mais energia electromagnética. No subcapítulo 4.1 apresenta-se então a análise espectral efectuada seguindo-se a antena escolhida (subcapítulo 4.2), as características dessa antena e os problemas associados à adaptação de impedâncias.

Todos os testes aqui apresentados para análise do espectro electromagnético foram feitos a partir do edifício do Departamento de Engenharia Electrotécnica da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa (DEE, FCT-UNL), cujas coordenadas são (38°39'36.94"N; 9°12'17.44"W). É com base na densidade espectral existente nesta localização que o sistema foi implementado. No entanto, o sistema funciona em quaisquer outros locais, desde que se mantenham certas premissas essenciais ao seu correcto funcionamento, nomeadamente a escolha de fontes de radiação electromagnética que operem às mesmas frequências ou a frequências semelhantes. Caso se modifiquem estas condições, o sistema poderá ainda funcionar através da substituição de alguns dos seus blocos constituintes, esquematizados na figura 3.1 deste documento.

4.1 Análise espectral

De forma a poder desenvolver o sistema de recolha de energia do ambiente, é necessário antes de tudo efectuar uma análise do conteúdo espectral no ambiente em redor, a fim de avaliar as possibilidades de recolha de energia. Só depois de efectuada uma análise espectral se poderão escolher as diversas fontes de energia RF às quais o sistema vai recolher energia.

A análise espectral aqui mostrada foi efectuada utilizando o analisador espectral “*GW Instek GSP827*”. Para efectuar esta avaliação utilizou-se ainda uma antena UHF, que será apresentada na secção 4.2. As características do analisador espectral utilizado permitem avaliar o conteúdo espectral entre os 9 kHz e os 2.7 GHz. Outras características importantes a salientar incluem o facto de se poder adaptar o analisador espectral tanto para 50 Ω como para 75 Ω , e de se poderem obter medições da densidade espectral de potência de um determinado canal (uma parcela bem delimitada do espectro analisado) automaticamente, isto é, sem ter de recorrer à integração manual do sinal contido nesse mesmo canal. O analisador espectral apresenta ainda resultados em diversas unidades (não lineares), o que permite mais facilmente tirar algumas conclusões acerca da quantidade espectral de energia presente em cada canal.

Como uma primeira análise espectral, optou-se por fazer um varrimento completo ao espectro que é possível analisar utilizando este analisador espectral. A largura de banda do filtro que efectua o varrimento (RBW) foi colocada nos 4 MHz, dado tratar-se de um teste inicial que não requer grande precisão. Este valor de RBW, tal como o seu nome indica, está associado à resolução com que é feito um varrimento do espectro.

A figura 4.1 mostra então um varrimento completo ao espectro que é permitido ver com este analisador espectral. Com unidade de medida da densidade espectral de potência, nas várias medições efectuadas, utilizou-se a grandeza ***dBmV***, definida como se enuncia de seguida.

$$dBmV = 20 * \log_{10}\left(\frac{V_{out}}{1mV}\right) \quad (V_{out} \text{ em mV})$$

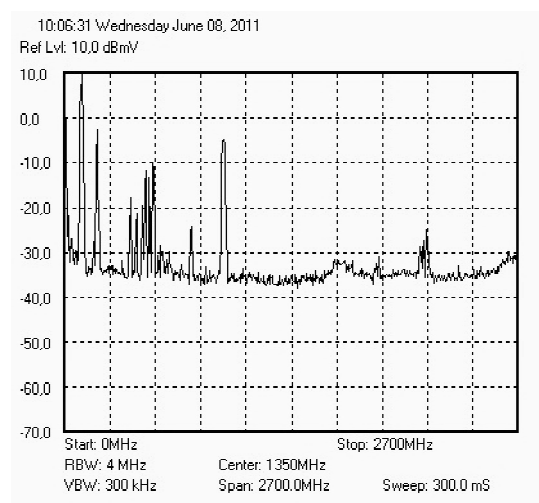


Figura 4.1 Varrimento completo do espectro

Como se pode verificar pela análise desta imagem (figura 4.1), pode facilmente fragmentar-se o espectro em quatro partes diferentes com elevado interesse para o sistema de recolha de energia. Cada um destes fragmentos de espectro poderá então ser utilizado como fonte de energia para o sistema de recolha.

- Gama de frequências entre 50MHz e 150 MHz que inclui, entre outras fontes, as emissoras de rádio FM;
- Gama de frequências entre 400MHz e 600MHz que inclui sinal UHF emitido por estações televisivas;
- Gama de frequências entre 850 MHz e 1GHz que contém sinal GSM emitido por estações base GSM;
- Gama de frequências entre 2.2GHz e 2.4 GHz que inclui a banda ISM dos 2.4 GHz.

Como se pode facilmente concluir, a gama de frequências que inclui a banda ISM nos 2.4 GHz é a pior das opções para se utilizar como fonte de energia RF para a operação do sistema. O baixo valor de energia aqui visualizado nesta banda deve-se fundamentalmente ao facto dos testes não terem sido realizados nas proximidades de nenhuma fonte a operar nestas frequências. No entanto, é visível que mesmo assim se consegue obter algum sinal, possivelmente proveniente dos inúmeros emissores de sinal das redes locais sem fios (wifi), existentes na FCT-UNL. Além disso, a operação nestas frequências obriga a maiores cuidados na realização do sistema, e dados os comprimentos de onda envolvidos (10cm ~ 15cm), será imperativa a utilização de uma malha de adaptação de impedâncias, o que sai dos objectivos de implementação deste sistema específico.

As restantes gamas de frequência mencionadas atrás poderão ser facilmente utilizadas para a operação do sistema de recolha de energia do ambiente. O sinal GSM existente é proveniente de uma antena emissora GSM colocada a cerca de 50 m do local onde foram efectuados estes testes. Pode ainda observar-se que apesar do sinal televisivo ter picos de potência com valores mais reduzidos, quando comparado com o sinal FM e GSM, existe uma maior densidade espectral neste fragmento do espectro, o que possibilita a recolha de maiores quantidades de energia. Além disso é preciso ter em conta que para a realização deste teste inicial a antena não estava correctamente alinhada com a estação emissora de sinal televisivo, o que reduz parcialmente a quantidade de energia recebida pela antena, dado tratar-se de uma antena direccionada.

Excluída então a possibilidade de obtenção de energia da gama de frequências da banda ISM nos 2.4GHz foi efectuada uma nova análise espectral cujos resultados se apresentam na figura 4.2, mostrada em seguida.

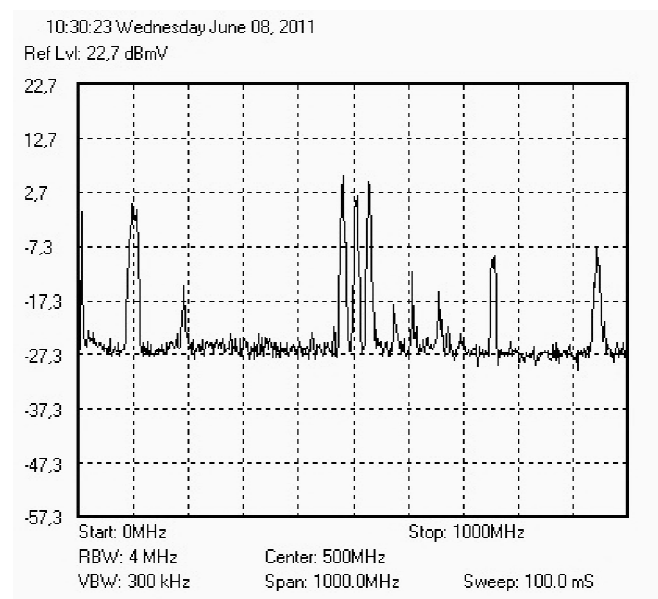


Figura 4.2 Varrimento parcial do espectro (9kHz a 1GHz).

Neste segundo teste, apesar de se notarem ainda claramente a existência de fontes de sinal FM e GSM, já é visível uma maior prevalência de sinal emitido por estações televisivas. A estação emissora de sinal televisivo mais próxima do local onde foram realizados os testes situa-se em Monsanto, Lisboa, e as suas coordenadas são (38°43'37.88"N; 9°11'20.95"W). Um mais correcto alinhamento da antena permite aumentar consideravelmente a quantidade de energia recebida. Este facto é perfeitamente visível comparando as duas imagens anteriores. No entanto é de salientar que a orientação da antena é apenas manual, pelo que será possível ainda melhorar consideravelmente os valores de energia recebidos. Também neste teste se utilizou uma resolução de 4MHz, visto ainda se estar numa fase inicial de escolha das fontes de energia mais adequadas. A partir deste ponto começa a ser óbvio qual a fonte principal de energia que se irá utilizar como base para a implementação do sistema de recolha de energia electromagnética do ambiente.

Tendo então como principal fonte de energia o sinal emitido por uma estação televisiva, realizaram-se mais alguns testes cujos resultados se apresentam nas figuras seguintes.

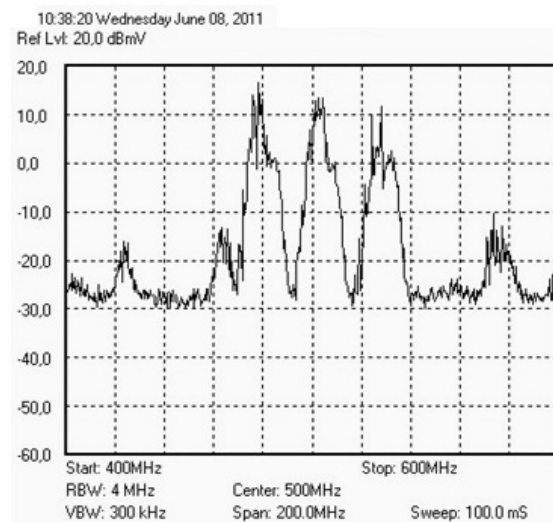


Figura 4.3 Varrimento espectral incluindo o sinal televisivo (400MHz a 600MHz).

Como se pode observar nas figuras 4.2 e 4.3 existem claramente três picos de sinal que se sobressaem relativamente ao restante sinal captado pela antena. A densidade espectral contida em cada um destes picos é de cerca de 9 dBm, o que corresponde a uma potência de cerca de 8 mW. Este valor de potência recebida é bastante razoável tendo em conta a distância que existe ao emissor. No entanto, pode verificar-se que é bastante diferente do valor teórico previsto, indicado de seguida.

Segundo dados¹ da ANACOM, por exemplo o pico central, corresponde a um sinal cuja potência aparente radiada (PAR) é de 450 kW, emitido na frequência 503.25 MHz.

Aplicando a Fórmula de Friis e, considerando ganhos das antenas unitários (não são divulgados pela ANACOM dados acerca da antena emissora, e por agora não é necessário considerar o ganho da antena receptora), em condições óptimas de transmissão tem-se:

$$\frac{P_r}{P_t} = \left(\frac{\lambda}{2\pi d}\right)^2 * G_r * G_t \Leftrightarrow P_r = \left(\frac{\lambda}{2\pi d}\right)^2 * P_t$$

Tendo $d = 7540 \text{ m}$

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 * 10^8}{503.25 * 10^6} \cong 0.6 \text{ m}$$

Obtém-se então:

$$P_r = \left(\frac{0.6}{2 * \pi * 7540}\right)^2 * 450000 \cong 5.7 \text{ W}$$

Como se pode verificar, o valor de potência efectivamente recebido (8 mW) é cerca de 100 vezes inferior ao valor teórico. Esta perda de potência deve-se obviamente às perdas inerentes à propagação de um sinal no espaço livre, que já foram brevemente descritas.

Os cálculos aqui apresentados podem ser extrapolados para os restantes picos de potência da figura 4.3 dado que segundo a ANACOM, as potências radiadas são semelhantes, tal como as antenas utilizadas para a emissão de sinal. A título de curiosidade refira-se ainda que os três picos de potência da figura 4.3 correspondem aos sinais emitidos por três canais televisivos TVI, RTP2 e SIC (por ordem crescente de frequência).

Com os dados aqui apresentados, é então possível verificar que nas condições actuais de funcionamento das emissoras de sinal televisivo, estão disponíveis cerca de 8 mW para se poderem recolher do meio ambiente. Este valor de potência é aceitável, pelo que o desenvolvimento do sistema de recolha de energia electromagnética do ambiente decorrerá tendo como base as fontes de sinal as aqui apresentadas (ilustradas na figura 4.3).

A figura 4.4, da página seguinte, consiste na análise espectral de cada um dos picos atrás descritos, com uma maior resolução (menor RBW), a fim de melhor se avaliarem as condições de recepção. É notório que os valores de potência dos sinais recebidos decresceram razoavelmente, no entanto este facto é natural, uma vez que tendo menor resolução, cada parcela do espectro é analisada com maior precisão. Além disso, é possível que o alinhamento

¹ Dados retirados do sítio da internet em: <http://www.anacom.pt/render.jsp?categoryId=42732>

da antena não seja tão correcto como no caso anterior, uma vez que, como já foi referido, este alinhamento é apenas manual. É importante ainda referir que os testes foram realizados com linha de vista para a antena emissora.

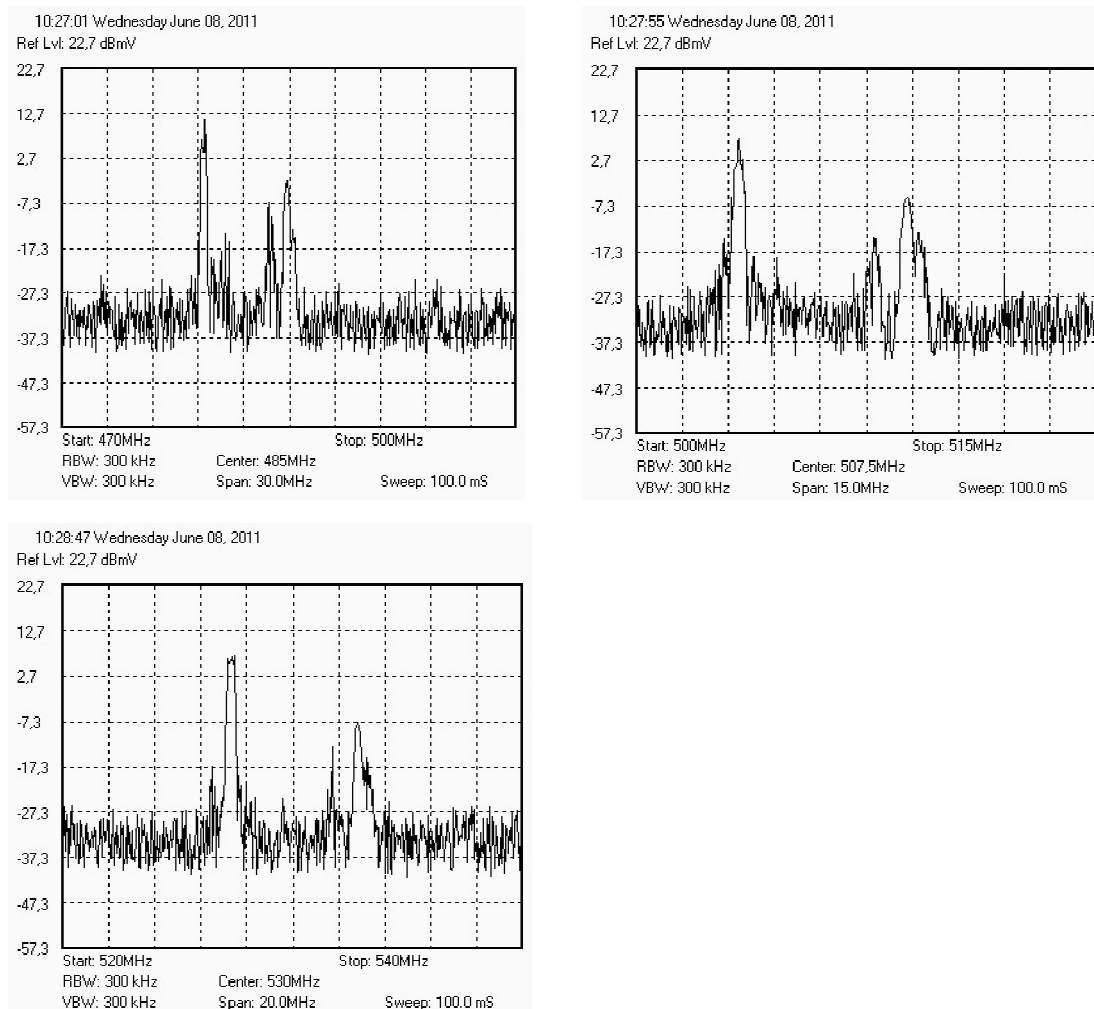


Figura 4.4 Espectro electromagnético dos canais televisivos.

(em cima à esquerda) Pormenor do primeiro pico de sinal RF (470 MHz a 500 MHz)

(em cima à direita) Pormenor do segundo pico de sinal RF (500 MHz a 515 MHz)

(em baixo) Pormenor do terceiro pico de sinal RF televisivo (520 MHz a 540 MHz)

4.2 Antena e adaptação de impedâncias

Tendo em conta as características espectrais apresentadas na secção anterior, é perfeitamente visível que para o sistema funcionar com base nas fontes desejadas, a antena a utilizar poderá ser uma antena para recepção de sinal televisivo. De entre as inúmeras opções possíveis optou-se pela utilização de uma antena para recepção de sinal UHF cujas características principais estão listadas na tabela 4.1, mostrada em seguida. De forma a melhor verificar estas mesmas características, a figura 4.5 contém uma fotografia da antena referida.

Frequência de Funcionamento	470 ~ 862 MHz
Ganho	11 ~ 12 dB
Tamanho Longitudinal	1,269 m
Número de elementos	47
Impedância	75 Ω

Tabela 4.1 Principais características da antena utilizada

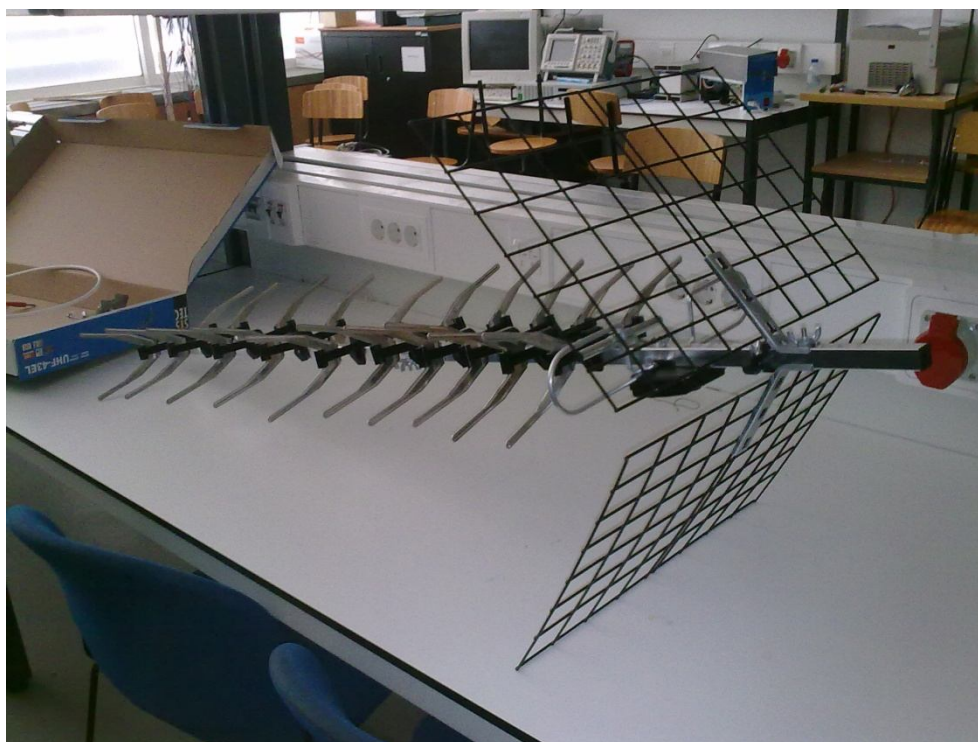


Figura 4.5 Antena utilizada

Como se pode verificar pela observação da tabela 4.1 figura 4.5, o tamanho da antena torna o sistema adequado apenas para aplicações exteriores. No entanto, dada a modularidade do sistema, substituindo a antena é possível utilizar o sistema em aplicações interiores. Observando a gama de frequências da antena facilmente se deduz que se trata de uma antena de largo espectro.

A opção por uma antena de largo espectro tem uma justificação. Tendo uma antena de largo espectro é possível recolher energia dispersa no ambiente de diversas fontes, incluindo fontes que emitam sinal com uma frequência para a qual o sistema não foi desenvolvido. Apesar de o sistema estar desenhado para funcionar numa gama de frequências entre os 475 MHz e os 525 MHz, é possível que a antena recolha energia de outras frequências, ainda que, devido à falta de adaptação de impedâncias, muita dessa energia se acabe por perder.

A principal razão devido à qual não se inseriu uma malha de adaptação no sistema é a complexidade que a colocação dessa malha trás ao sistema em si. Para se inserir e utilizar correctamente uma malha de adaptação de impedâncias é necessário ter em conta a impedância da antena e do restante sistema a jusante da malha de adaptação. É portanto necessário saber qual a impedância do multiplicador e regulador quando a operar à frequência desejada. A antena está adaptada para funcionar com uma impedância de $75\ \Omega$, impedância característica dos sistemas de emissão de sinal televisivo. No entanto, a grande maioria dos dispositivos analisadores de impedâncias está adaptado para o funcionamento com impedâncias de $50\ \Omega$, que são típicas nas telecomunicações. Será portanto necessário saber qual a impedância do multiplicador e regulador, a operar à frequência de trabalho, e esta impedância será caracterizada, tendo como base os $50\ \Omega$ do analisador de impedâncias. Para minimizar as perdas de adaptação será então necessário adaptar a impedância da antena ($75\ \Omega$) à impedância do resto do circuito (com base nos $50\ \Omega$), o que implica a introdução de mais um bloco no sistema.

Esta complexidade e as perdas associadas à introdução de mais um bloco tornam pouco prática a utilização de uma malha de adaptação, pelo que se optou pela não utilização de qualquer tipo de adaptação. Claro que se está neste ponto a assumir que irão existir algumas perdas devido à não adaptação do circuito, mas essas perdas poderão ser compensadas pela simplicidade do circuito. Além disso, dada a gama de frequências de trabalho (centrada nos 500 MHz) do sistema, o correspondente valor de comprimento de onda será de 0.6 m. Tendo os cuidados necessários na implementação do circuito, é perfeitamente possível miniaturizar o sistema para que os problemas de reflexão do sinal sejam praticamente desprezáveis.

Outro facto devido ao qual se optou pela não utilização de uma malha de adaptação é a indefinição quanto à malha de adaptação a utilizar nesta frequência de trabalho. Está-se numa zona de indefinição entre a utilização de componentes discretos ou distribuídos para a realização da malha de adaptação. Se para frequências superiores (tipicamente superiores a 1 GHz) é perfeitamente aceite que se utilizem parâmetros distribuídos para a implementação da malha (através de “microstrips”), para frequências mais baixas utilizam-se ainda elementos discretos. A utilização de elementos discretos tem obviamente a desvantagem destes se comportarem de

forma diferente consoante a frequência em que estão a operar. Devido a todos estes factos optou-se então pela não utilização de uma malha de adaptação, como já foi referido.

A não utilização de uma malha de adaptação para este sistema, que está desenhado para uma frequência de trabalho de 500 MHz (0.6 m de comprimento de onda), tem, por fim, outra vantagem. Dado a antena utilizada ser de largo espectro, é possível que se consiga recolher energia de outras fontes que não as definidas como principais. Se para fontes que emitam um sinal cuja frequência é superior à frequência de trabalho do sistema a falta de adaptação poderá vir a ser um problema (pois sendo o comprimento de onda menor os problemas de reflexão do sinal surgem para menores distâncias), para fontes cujo sinal emitido tem frequências inferiores à frequência de trabalho, a não existência de adaptação não é um problema (pois o comprimento de onda desses sinais é maior que o dos sinais para os quais o sistema é projectado). Assim, sem a existência de malha de adaptação, espera-se também que o sistema consiga recolher alguma energia proveniente de emissores de sinal rádio FM, cuja gama de frequências de funcionamento engloba frequências entre os 87 MHz e os 108 MHz.

Tendo em conta todos os aspectos enunciados neste capítulo, deverá então passar-se ao desenvolvimento de multiplicadores de tensão capazes de elevar a tensão de saída do sistema ao nível desejado.

(Esta página foi propositadamente deixada em branco)

5 Multiplicadores de tensão

O nível de potência disponível para recolha do meio ambiente é de cerca de 9 dBm, como se verificou no capítulo anterior. Linearizando este valor, pode afirmar-se que estão disponíveis para recolha do ambiente cerca de 8 mW. Considerando que a antena tem uma impedância característica de 75Ω , então pode dizer-se que se tem à saída da antena uma tensão de 720 mV, considerando o restante circuito em aberto. Tendo este valor de tensão, que se espera que baixe ao aplicar carga no circuito, é imperativa a utilização de um circuito multiplicador de tensão para se poder elevar o valor da tensão a um nível adequado para o funcionamento do sistema. O valor de tensão que se esperará obter à saída do sistema de conversão de energia não deve ser inferior a 1.2 V, pelo que pelo menos numa primeira abordagem o valor da tensão à saída do multiplicador deverá ultrapassar os 2 V. Esta diferença de tensão entre a saída do multiplicador e a saída do sistema é justificada pela existência de um regulador de tensão a seguir ao multiplicador. Isto considera obviamente que o regulador de tensão utilizado será do tipo “buck”, ou seja, um conversor redutor de tensão. No entanto, poderá não ser esse o caso. Maiores considerações sobre o regulador serão efectuadas no capítulo respectivo.

É muito importante referir que este componente é fundamental para o correcto funcionamento do sistema de recolha de energia, o que significa que o seu projecto deve envolver todos os cuidados necessários a fim de se conseguir obter um multiplicador cuja funcionalidade é a desejada, minimizando as perdas de energia que inevitavelmente irão ocorrer. Tendo em conta os valores de potência envolvidos, as perdas que naturalmente ocorrem têm que ser minimizadas, pois o ignorar destas mesmas perdas levaria certamente ao incorrecto funcionamento ou mesmo não funcionamento não só do multiplicador como de todo o sistema de recolha de energia.

Ao longo do projecto apresentado nesta secção foram simulados e implementados quatro multiplicadores de tensão cujos resultados se apresentam. Será ainda feita uma breve comparação entre as diversas soluções, a fim de avaliar as diferenças entre elas, assim como as vantagens e desvantagens de cada aproximação. No entanto, e apesar do projecto do multiplicador ser a parte fundamental, considera-se necessário principiar este capítulo com uma breve explicação do princípio de funcionamento dos multiplicadores de tensão e das diversas abordagens que podem ser seguidas.

5.1 Multiplicadores de tensão – Princípio de funcionamento

De uma forma muito geral, multiplicadores de tensão são circuitos electrónicos que apresentam na sua saída uma tensão eléctrica cujo valor é superior à tensão de alimentação (ou tensão de entrada) deste mesmo circuito [12]. À primeira vista, os multiplicadores de tensão são circuitos bastante simples, mas cujo comportamento final é extremamente dependente de um bom projecto. O princípio de funcionamento dos multiplicadores é bastante simples e assenta no princípio básico de duplicar uma tensão, que se descreve em seguida.

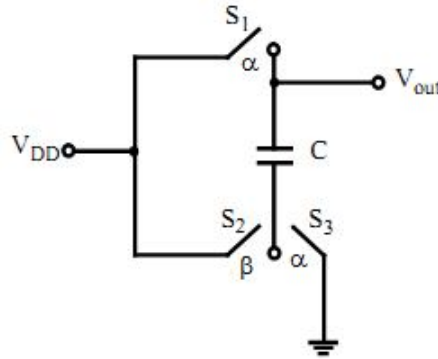


Figura 5.1 Princípio de funcionamento de um duplicador de tensão

Considere-se que se conseguem controlar os interruptores S_1 , S_2 e S_3 para funcionar durante certos períodos de tempo. Considerem-se ainda que todos os dispositivos são ideais.

Durante um período de tempo α os interruptores S_1 e S_3 são fechados e, portanto, durante este período de tempo, o condensador C é carregado à tensão V_{DD} . Em seguida, durante um período de tempo β , o interruptor S_2 é fechado e os interruptores S_1 e S_3 são abertos. Isto significa que se irá aplicar à parte inferior do condensador uma tensão V_{DD} . Dado que no ciclo anterior (ciclo α) o condensador tinha uma carga

$$Q = V_{DD} * C$$

Então isto significa que durante o ciclo de tempo β :

$$(V_{out} - V_{DD}) * C = V_{DD} * C$$

$$\Leftrightarrow V_{out} = 2 * V_{DD}$$

Como se pode então verificar, não existindo carga, este circuito duplica a tensão de entrada. Considere-se agora a aplicação de uma carga no circuito, representada pelo resistor R_L . A aplicação deste resistor no circuito implica também a utilização de um novo condensador C_{out} , tendo-se assim o circuito da figura 5.2.

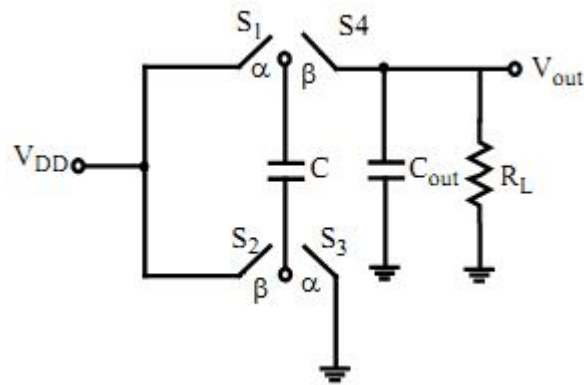


Figura 5.2 Duplicador de tensão

É necessário notar que a existência de uma carga no circuito leva agora ao aparecimento de uma tensão de ondulação (“ripple voltage”) V_R . Esta tensão de ondulação aparece obviamente devido aos tempos de carga e descarga dos condensadores. No entanto, se o valor de C_{out} for suficientemente grande então V_R é baixa face a V_{out} e portanto poderá ser desprezada.

Considerando este princípio, é possível que os multiplicadores de tensão multipliquem o valor da tensão de entrada por um valor superior a 2 através da ligação em cascata de diversos circuitos da figura 5.2.

5.2 Multiplicadores de tensão – Principais topologias

Os primeiros multiplicadores de tensão a utilizar a técnica descrita na secção anterior foram propostos por Cockcroft e Walton [13] há quase um século e tinham aplicação em circuitos de alta tensão. Devido ao trabalho destes dois cientistas, os multiplicadores que seguem esta topologia designam-se ainda actualmente como multiplicadores de tensão Cockcroft-Walton.

A figura 5.3, mostrada em seguida, contém o circuito eléctrico de um multiplicador de tensão de Cockcroft-Walton (CW).

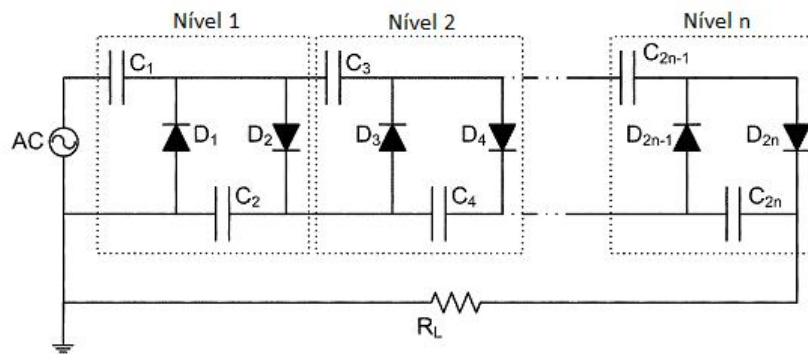


Figura 5.3 Multiplicador de tensão Cockcroft-Walton

Define-se como um nível a multiplicação de tensão por 2, ou seja, a aplicação de um duplicador de tensão.

Considere-se um multiplicador Cockcroft-Walton de n níveis, como o da figura 5.3, sem carga acoplada. Defina-se X como o rácio de tensão entre o valor médio da tensão de saída e o valor de pico da tensão de entrada (considerando uma tensão alternada sinusoidal), ou seja, o ganho de tensão do circuito.

$$X = \frac{\{V_{out}\}_{med}}{V_M}$$

No caso do multiplicador ideal, sem carga acoplada tem-se

$$X_0 = \frac{\{V_{out}\}_{med}}{V_M} = 2 * n$$

No entanto, quando se tem uma carga ligada ao multiplicador de tensão, carga essa representada na figura 5.3 pelo resistor R_L , esta carga vai gerar flutuações da tensão nos condensadores, devido obviamente ao processo de carga e descarga destes. Como resultado desta variação de tensão nos condensadores, vai aparecer na saída uma tensão de ondulação (ripple voltage) δ e também uma queda de tensão ΔV_{out} .

Do estudo realizado em [15], [16] e [17] e considerando que:

- A carga total que flui para o nível k é k vezes menor que o total da carga a fluir no primeiro nível;

- A duração dos períodos de carga e descarga dos condensadores é muito menor que a duração de um período do sinal de entrada

Pode chegar-se a expressões analíticas que permitem obter o rácio X em função dos valores dos condensadores utilizados.

$$X = X_0 - \frac{1}{V_M} \left(\Delta V_{out} + \frac{1}{2} \delta \right) \quad (5.1)$$

$$\frac{\Delta V_{out}}{V_M} = \frac{g}{f} * \left(\sum_{i=1}^n \frac{(n+1-i)^2}{C_{2i-1}} + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{(n+1-i) * (n-1)}{C_{2i}} \right) \quad (5.2)$$

$$\frac{\delta}{V_M} = \frac{g}{f} * \sum_{i=1}^n \frac{(n+1-i)}{C_{2i}} \quad (5.3)$$

Onde f é a frequência de operação do sistema, $g = \frac{I_{out}}{V_M}$, sendo I_{out} a corrente de saída do multiplicador.

É assim claro que a tensão de saída do multiplicador depende da queda de tensão ΔV_{out} e da tensão de ondulação δ . É ainda claro que a tensão de saída do sistema diminui à medida que a corrente de saída I_{out} aumenta.

Atendendo às expressões 5.2 e 5.3 pode ainda verificar-se que a tensão de ondulação δ só é afectada pelos condensadores de índice par, enquanto a queda de tensão ΔV_{out} é afectada tanto pelos condensadores de índice par como pelos condensadores de índice ímpar.

Por agora e, dado tratar-se do caso clássico do multiplicador de Cockcroft-Walton, deve considerar-se que todos os condensadores são iguais. Como se verá mais adiante neste documento, há algumas variantes que poderão ter vantagens, mas por agora é suficiente demonstrar o estudo do caso clássico.

Considerando assim $C = C_{2i-1} = C_{2i}$, e combinando as expressões 5.1 a 5.3 obtém-se

$$X = 2 * n - \frac{g}{f * C} * \left(\frac{4n^3 + 3n^2 - n}{6} + \frac{n * (n+1)}{4} \right) \Leftrightarrow$$

$$X = 2 * n - \frac{g}{f * C} * \left(\frac{8n^3 + 9n^2 + n}{12} \right) \quad (5.4)$$

A expressão 5.4 permite então relacionar o ganho de tensão de um multiplicador Cockcroft-Walton de n níveis com a frequência de trabalho e o valor dos condensadores utilizados.

A figura 5.4 mostra o exemplo de um multiplicador Cockcroft-Walton de quatro níveis. Como se pode verificar, este circuito não é mais que a cascata de quatro duplicadores de tensão. É importante relembrar que no caso ideal este será um multiplicador de tensão por 8, tendo, no entanto, uma queda de tensão, que não deve ser desprezada.

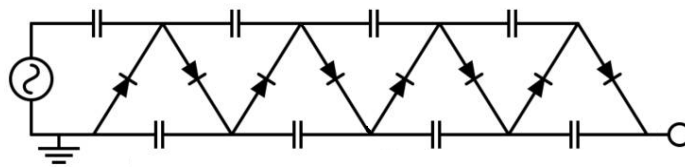


Figura 5.4 Multiplicador Cockcroft-Walton de 4 níveis

Considerando o princípio básico da multiplicação de tensão e o circuito multiplicador de Cockcroft-Walton, foi desenvolvido por J. Dickson um novo circuito multiplicador de tensão que viria a ser conhecido como multiplicador de Dickson ou na sua versão inglesa “Dickson Charge Pump” [14]. A partir deste momento os multiplicadores de tensão na literatura inglesa passaram a ser conhecidos tanto por “voltage multipliers” como por “charge pumps”. A figura 5.5 mostra o multiplicador de tensão de Dickson. Uma das razões que levou ao desenvolvimento deste novo tipo de multiplicador foi o facto do multiplicador Cockcroft-Walton apresentar muitas perdas de substrato, quando implementado recorrendo a circuitos integrados [13].

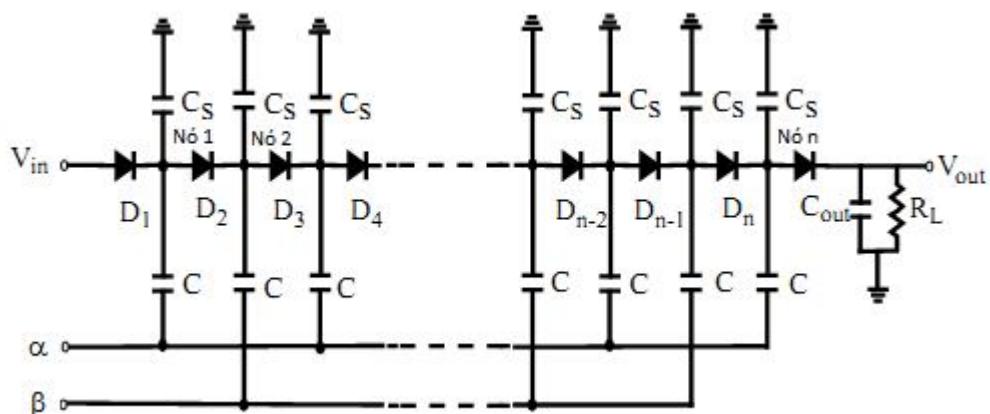


Figura 5.5 Multiplicador de tensão de Dickson

Considere-se a existência de dois sinais de relógio de amplitude V_C em oposição de fase e representados por α e β . Considere-se ainda que os díodos são todos iguais e caracterizados por uma tensão de limiar de condução directa V_D . Dadas estas considerações, segue-se a descrição do funcionamento deste multiplicador de tensão.

Durante o ciclo β , o díodo D_1 está à condução, sendo a tensão no nó 1 igual a $V_{in} - V_D$. Aplicando agora a tensão V_C , no ciclo α , a tensão no nó 1 passa a ser $V_{in} + (V_C - V_D)$. Isto leva a que o díodo 2 entre à condução, até se obter no nó 2 a tensão $V_{in} + (V_C - V_D) - V_D$. Quando se entra num novo ciclo β , a tensão no nó 2 passa então a ser $V_{in} + 2(V_C - V_D)$. Este processo repete-se e tendo um multiplicador com N díodos é fácil verificar que a tensão de saída será dada por

$$V_{out} = V_{in} + N * (V_C - V_D) - V_D$$

No entanto, a existência do condensador C_S leva a uma queda da tensão V_C , dada por um factor $\frac{C}{C+C_S}$. Assim tem-se então

$$V_{out} = V_{in} + N * \left(\left(\frac{C}{C + C_S} \right) V_C - V_D \right) - V_D$$

É ainda necessário ter em conta que tendo uma carga ligada ao circuito, carga essa representada pelo resistor R_L na figura 5.5, a existência dessa carga leva ao aparecimento de uma corrente de saída I_{out} , o que implica que a tensão de saída seja reduzida numa quantidade

$$\frac{N * I_{out}}{(C + C_S) * f_{osc}}$$

Onde f_{osc} representa a frequência de funcionamento do multiplicador, ou seja, a frequência dos ciclos α e β .

Desta forma, a tensão de saída será então dada por

$$V_{out} = V_{in} + N * \left(\left(\frac{C}{C + C_S} \right) V_C - V_D - \frac{I_{out}}{(C + C_S) * f_{osc}} \right) - V_D \quad (5.5)$$

Devido à existência de carga, aparecerá ainda uma tensão de ondulação cujo valor pode ser dado por

$$V_R = \frac{I_{out}}{f_{osc} * C_{out}} = \frac{V_{out}}{f_{osc} * C_{out} * R_L} \quad (5.6)$$

Desta forma, atendendo às expressões 5.5 e 5.6, é possível caracterizar completamente o multiplicador de tensão de Dickson.

A figura 5.6, em baixo, mostra o exemplo de um multiplicador de tensão de Dickson de quatro níveis. No entanto, deve ser notado que no ânodo de cada diodo não estão ligados dois condensadores, como no caso da figura 5.5, mas apenas um. A ligação destes condensadores alterna entre o terminal positivo do sinal de entrada e a massa. A massa está ligada directamente ao terminal negativo do sinal de entrada.

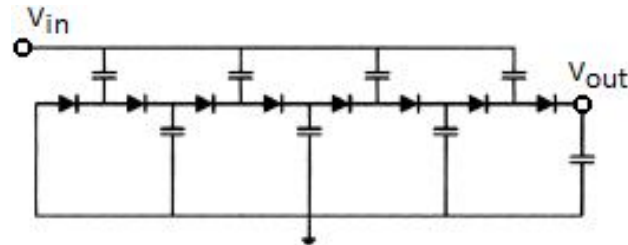


Figura 5.6 Multiplicador de tensão de Dickson com quatro níveis

É de notar ainda que na figura 5.5 consideraram-se como entradas dos multiplicadores de Dickson tensões contínuas, dado ser esta a aplicação original deste tipo de multiplicadores. Se a tensão de entrada do multiplicador for uma tensão alternada, então as próprias alternâncias da tensão de entrada são utilizadas como relógio do multiplicador, tornando assim mais simples o funcionamento do mesmo. Desta forma, é o próprio sinal de entrada a definir a frequência de funcionamento do multiplicador. A figura 5.6, atrás apresentada, considera o sinal de entrada como um sinal alternado, daí o não aparecimento de uma fonte externa de relógio. Considerando fontes de energia alternadas, o funcionamento dos multiplicadores fica trivial e dependente da frequência do sinal de entrada.

Tendo em conta que a tensão aplicada ao multiplicador de Dickson, no contexto deste trabalho, é uma tensão alternada e que o multiplicador original é modificado para corresponder ao multiplicador da figura 5.6, quando se usam tensões alternadas, então a equação 5.5 que descreve o funcionamento deste multiplicador, isto é, devolve a tensão de saída em função da tensão de entrada, deixa de ser válida. É então necessário verificar como se comporta o multiplicador de Dickson, quando se tem na sua entrada uma tensão alternada.

Considere-se então o multiplicador Dickson da figura seguinte

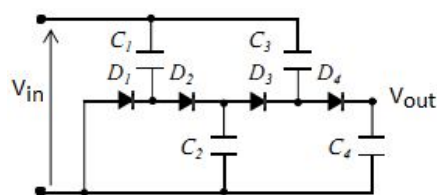


Figura 5.7 Multiplicador Dickson de dois níveis

Nas alternâncias positivas e negativas do sinal de entrada são percorridos dois circuitos diferentes. Estes circuitos estão ilustrados na figura 5.8, ilustrada em seguida.

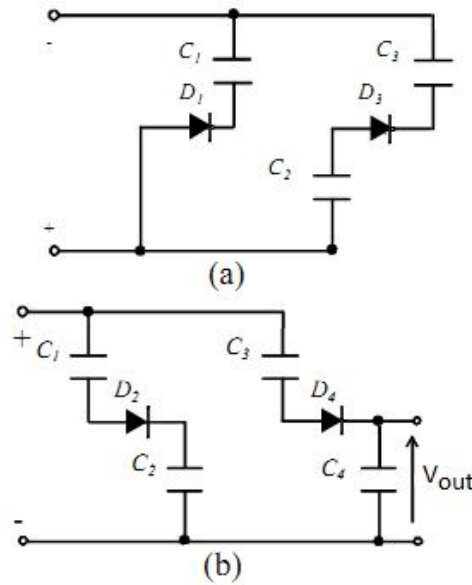


Figura 5.8 Ciclos de operação do multiplicador de Dickson: a) alternância negativa do sinal de entrada; b) alternância positiva do sinal de entrada

Considerando V_a como o valor de tensão que o multiplicador vai adicionar ao valor na entrada, V_D a queda de tensão de cada díodo, V_{in} a tensão de entrada do multiplicador e n o número de níveis do multiplicador, em [21] prova-se que

$$V_a = 2n * (V_{in} - V_D)$$

Na saída do multiplicador ter-se-á portanto

$$V_{out} = V_{in} + V_a = V_{in} + 2n * (V_{in} - V_D) \quad (5.7)$$

Desta forma, com a equação 5.7, é, portanto, possível modelar o comportamento de um multiplicador Dickson, quando a sua entrada tem um sinal alternado, que é exactamente o caso dos sistemas de recolha de energia do ambiente. Como se pode verificar, o valor de saída de um multiplicador dependerá não só do número de níveis como também dos díodos utilizados e do próprio valor da tensão de entrada do multiplicador.

De forma a melhor exemplificar o funcionamento dos multiplicadores, quando alimentador por fontes alternadas, considere-se novamente um multiplicador Cockcroft-Walton (CW) de 4 níveis, representado na figura 5.9.

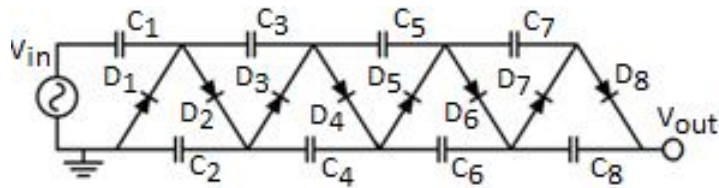


Figura 5.9 Multiplicador CW de 4 níveis

Considere-se como sinal de entrada deste multiplicador uma fonte sinusoidal cujo sinal é dado por $V_{in} = V_M * \sin(\omega t)$. Considere-se que a numeração dos elementos é a indicada na figura. Todos os condensadores são iguais, tal como todos os díodos.

Durante as alternâncias positivas do sinal de entrada, o condensador C_1 é carregado até atingir um valor de carga $Q = V_M * C$. Após o carregamento deste condensador, o díodo D_2 irá entrar à condução, sendo que na próxima alternância positiva se vai carregar o condensador C_3 . Durante as alternâncias negativas do sinal de entrada, vai ser carregado o condensador C_2 e, após esta carga, vai entrar à condução o díodo D_1 , o que leva a que na próxima alternância se carregue o condensador C_4 . A repetição deste processo de carga vai carregar todos os condensadores, entrando à condução cada um dos díodos correspondentes até se atingir o valor da tensão de saída. Tal como já foi dito, neste caso, considerando o multiplicador ideal, o valor da tensão de saída será 8 vezes maior que o valor de pico da tensão de entrada, isto é

$$V_{out} = 8 * V_M$$

Também aqui a introdução de uma carga levará à queda da tensão de saída e ao aparecimento de uma tensão de ondulação, como foi visto anteriormente.

O número de alternâncias positivas e negativas, isto é, o número de ciclos do sinal de entrada que a tensão de saída do circuito demora a estabilizar, depende obviamente da frequência do sinal de entrada, mas também do valor dos condensadores utilizados. Intuitivamente é fácil verificar que quanto maior for o valor de capacidade dos condensadores, mais tempo o circuito demorará a estabilizar, mas menor será a tensão de ondulação (relembrar que o valor da tensão de ondulação depende do valor do último condensador do circuito), o que gera logo um ponto sensível no projecto de qualquer multiplicador.

O funcionamento do multiplicador de Dickson, tendo como alimentação uma fonte alternada de tensão é exactamente igual ao aqui descrito, pelo que se omite uma descrição pormenorizada do mesmo.

Apesar de existirem outras topologias de construção de multiplicadores de tensão, como o multiplicador Fibonacci ou o multiplicador série-paralelo, as descritas nos parágrafos anteriores são as mais importantes e aquelas que têm relevância para este trabalho em questão, pelo que se omite qualquer descrição das topologias agora mencionadas. Além disto, muitas destas topologias resultam de alterações efectuadas ao multiplicador Cockcroft-Walton, ou ao multiplicador de Dickson, pelo que é justo afirmar que estas duas topologias aqui apresentadas são a base dos multiplicadores de tensão.

Uma das partes fundamentais do projecto de qualquer multiplicador é a escolha dos diversos componentes que o vão constituir. Se nos condensadores não existe grande problema, nos díodos a questão é um pouco mais complexa, pois existem muitos tipos de díodos no mercado. No entanto, tipicamente escolhem-se díodos Schottky para a implementação de multiplicadores de tensão, uma vez que estes díodos apresentam diversas vantagens, face aos díodos de junção p-n[18]. Estas vantagens incluem uma velocidade de modificação de estado superior e uma mais baixa tensão de limiar de condução directa, o que dá ao multiplicador um mais alargado conjunto de aplicações. Além destas vantagens, os díodos Schottky apresentam menores perdas de substrato, o que é um factor bastante importante, caso se tenha uma implementação recorrendo a tecnologia CMOS. No caso específico da recolha de energia do ambiente, deve ter-se em atenção a tensão de limiar de condução dos díodos, uma vez que este valor pode variar bastante nos díodos existentes no mercado. Recorde-se que no caso do multiplicador de Dickson, o valor da multiplicação depende inclusivamente deste valor de tensão, pelo que a escolha dos componentes correctos é uma parte fundamental para assegurar o funcionamento desejado do multiplicador.

5.3 Multiplicadores de tensão implementados

Ao longo deste trabalho foram implementados quatro multiplicadores de tensão. Por questões de simplicidade de leitura do documento, considerem-se as letras A, B, C e D para identificar cada um dos quatro multiplicadores implementados. Desta forma, cada multiplicador pode ser identificado inequivocamente, com relativa facilidade. O projecto desses multiplicadores será descrito nesta secção. São apresentados todos os resultados obtidos nas simulações realizadas a cada um dos multiplicadores. Todas as simulações realizadas nesta secção foram realizadas com recurso ao software de simulação de circuitos eléctricos OrCAD PSPICE (versão 10.5), utilizando modelos adequados aos diversos componentes. A utilização de modelos adequados aos diversos componentes significa que se consegue aproximar o comportamento real dos mesmos, uma vez que a modelação de cada um dos componentes é feita pelo fabricante, tendo em conta o comportamento real do componente em questão. Particularmente, estes modelos têm em conta as perdas óhmicas dos componentes, o que se traduz pela existência de resistores em série com os dispositivos assim como a variação da impedância do dispositivo, que como se sabe depende da frequência de trabalho. Desta forma, e utilizando modelos adequados para os diversos componentes constituintes dos multiplicadores, espera obter-se desde já um comportamento o mais perto possível do comportamento real do circuito.

Os díodos utilizados serão díodos Schottky, tal como usualmente se faz nos projectos de multiplicadores de tensão. Serão ainda apresentados os resultados dos testes efectuados a cada um dos multiplicadores isoladamente. Para os testes foi utilizada uma fonte de sinal que gera sinais sinusoidais até uma frequência de 20 MHz com diversas amplitudes. É importante notar que os testes aqui mencionados foram realizados sem a existência de carga nos multiplicadores, pelo que os valores da tensão de saída e da tensão de ondulação deverão mudar quando se aplicar uma carga no multiplicador. Os testes ao sistema completo, considerando carga no multiplicador serão apresentados no capítulo respectivo.

Para finalizar o estudo de cada multiplicador apresenta-se uma comparação entre os diversos resultados obtidos e uma explicação para possíveis discrepâncias entre os valores obtidos nas simulações e os valores obtidos nos testes ao protótipo implementado.

No término desta secção, é efectuada uma comparação entre os diversos multiplicadores implementados e são explicadas as diferenças existentes entre os diversos circuitos, antes de se proporem algumas modificações que deverão melhorar o comportamento do multiplicador que se considere ser aquele cujos resultados dão maiores garantias de funcionamento do sistema de recolha de energia electromagnética do ambiente.

5.3.1 Multiplicador Cockcroft-Walton de 4 níveis – “Multiplicador A”

O primeiro multiplicador simulado e implementado foi um multiplicador Cockcroft-Walton de quatro níveis. Atendendo à teoria dos multiplicadores de tensão, já descrita, este multiplicador será então capaz de multiplicar por oito o valor da amplitude da tensão na sua entrada. Dado o valor de tensão que se espera obter à saída da antena, uma multiplicação por oito será suficiente para elevar o valor da tensão do sistema ao nível desejado (2 V), pelo que se espera que um multiplicador de quatro níveis seja suficiente.

5.3.1.1 Multiplicador A – Visão Geral

As figuras 5.10 e 5.11, em seguida, mostram o multiplicador implementado e o esquema eléctrico utilizado na simulação OrCAD PSPICE, respectivamente. Como se pode verificar, este multiplicador é em tudo semelhante ao já referenciado na figura 5.9.

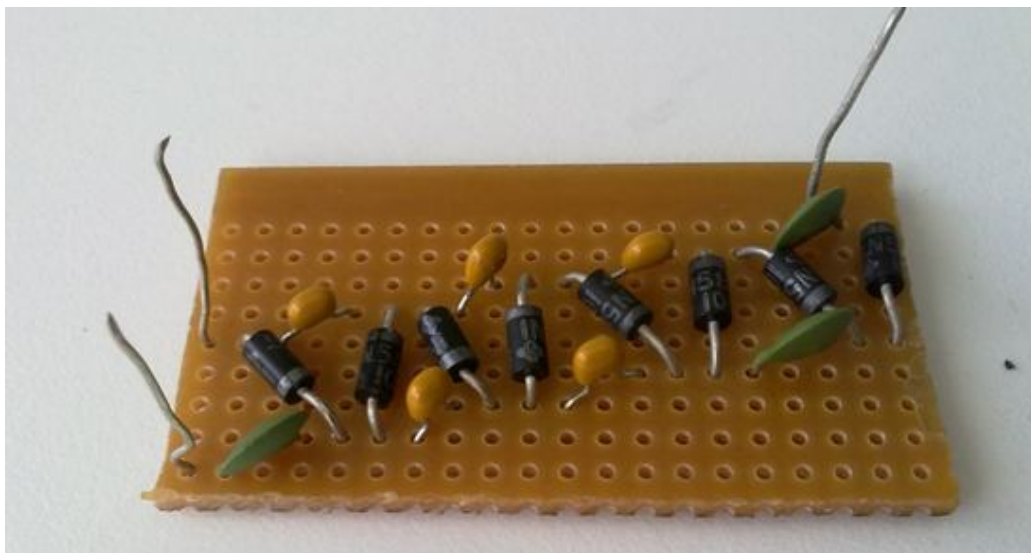


Figura 5.10 Multiplicador A: circuito implementado

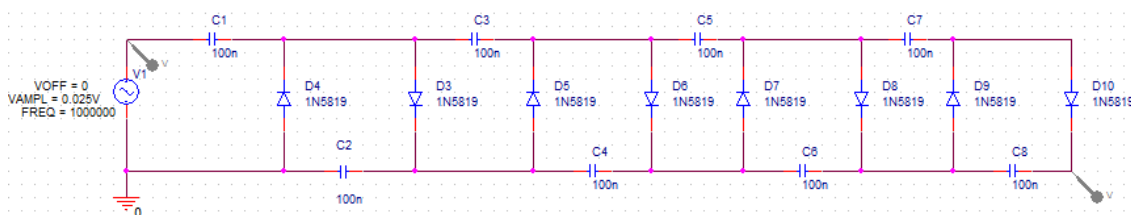


Figura 5.11 Multiplicador A: circuito simulado

Como se pode verificar na figura 5.10, para a implementação deste multiplicador foi utilizada uma placa de desenvolvimento de protótipos com faixas de cobre e isolamento SRBP. Foram utilizados condensadores cuja capacidade é 100 nF. Os díodos utilizados são do tipo 1N5819. O valor dos condensadores foi escolhido de forma a tentar minimizar a tensão de ondulação na saída, tendo obviamente em conta o tempo de resposta do multiplicador, isto é, o tempo que a tensão de saída demora a atingir o seu valor final. Para efeitos de simulação foi

utilizada como fonte de sinal uma fonte sinusoidal, ideal, cujo valor de amplitude e frequência pode ser modificado. Tal como já se referiu, optou-se por implementar um multiplicador de Cockcroft-Walton clássico, pelo que os condensadores têm todos os mesmos valores de capacidade. Os testes aqui realizados, como pode ser facilmente visto na figura 5.11, não têm em conta a carga que deverá existir no multiplicador.

Tendo em consideração a expressão 5.4 que relaciona o ganho de tensão de um multiplicador Cockcroft-Walton com a frequência e o valor dos condensadores utilizados, para um multiplicador de quatro níveis ter-se-á

$$X = 2 * n - \frac{g}{f * C} * \left(\frac{8n^3 + 9n^2 + n}{12} \right) = 8 - 55 * \frac{g}{f * C} \quad (5.8)$$

com $g = \frac{I_{out}}{V_M}$.

Sabe-se que a frequência de trabalho do sistema será 500 MHz. No entanto, olhando para a expressão anterior, e sem fixar o valor dos condensadores, continuam a ter-se duas incógnitas. O valor dos condensadores e o valor da corrente de saída. Devido a este facto foram então fixados os valores dos condensadores, de forma a se poder mais facilmente implementar o multiplicador.

5.3.1.2 Multiplicador A – Resultados da simulação

De forma a conseguir avaliar melhor o desempenho do multiplicador foram então realizadas uma série de simulações, que estão sintetizadas na tabela 5.1, mostrada na página seguinte. Será demonstrado como se obtiveram os valores referentes à primeira linha da tabela, sendo que se procedeu de igual forma nas restantes simulações. Os valores da amplitude do sinal de entrada foram escolhidos para que as simulações se assemelhem o máximo possível ao funcionamento real do multiplicador, dando também uma ideia das capacidades do mesmo. Relativamente às frequências, simularam-se frequências da ordem da frequência de trabalho do sistema de recolha de energia do ambiente, mas também frequências relativamente inferiores, para se poderem comparar os resultados obtidos em simulação e na implementação do multiplicador, uma vez que não foi possível testar o multiplicador a frequências da ordem da frequência de trabalho do sistema de recolha de energia.

Tanto na análise do funcionamento deste multiplicador como dos restantes, define-se como eficiência do multiplicador, na conversão do sinal RF para um sinal DC como:

$$Ef (\%) = \frac{\{V_{out}\}_{med}}{\{V_{out}\}_{med_{ideal}}} * 100$$

V_M [V]	f [MHz]	$\{V_{out}\}_{med}$ [V]	$X = \frac{\{V_{out}\}_{med}}{V_M}$	δ [mV]	Ef (%)
0,5	10	3,145	6,29	20	78,6
	20	3,155	6,31	20	78,9
	50	3,14	6,28	20	78,5
	100	3,13	6,26	20	78,3
	500	3,01	6,02	20	75,3
0,25	10	1,32	5,28	10	66,0
	20	1,325	5,3	10	66,3
	50	1,305	5,22	10	65,3
	100	1,3	5,2	10	65,0
	500	1,278	5,112	10	63,9
0,1	10	0,333	3,33	5	41,6
	20	0,335	3,35	5	41,9
	50	0,332	3,32	5	41,5
	100	0,33	3,3	5	41,3
	500	0,311	3,11	5	38,9

Tabela 5.1 Multiplicador A: resultados da simulação

Para a obtenção dos dados presentes na primeira linha da tabela 5.1 foi simulado o circuito presente na figura 5.11, já mostrada, considerando a fonte sinusoidal com as seguintes características:

- Amplitude: 0,5V
- Frequência: 10 MHz

Estas características foram posteriormente alteradas de forma a se conseguirem obter todos os resultados presentes na tabela 5.1.

O valor médio da tensão na saída do multiplicador $\{V_{out}\}_{med}$, e o valor da tensão de ondulação δ , foram obtidos através da análise da onda de saída obtida. As figuras 5.12 e 5.13, ilustradas em seguida, demonstram a validade dos resultados obtidos e constantes da tabela 5.1.

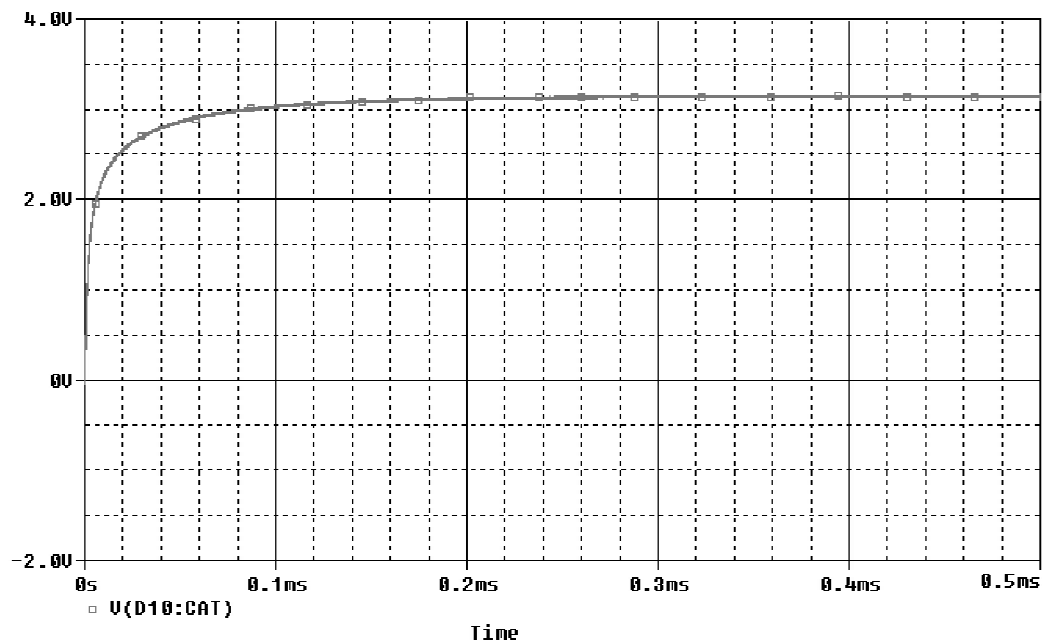


Figura 5.12 Multiplicador A: onda de saída

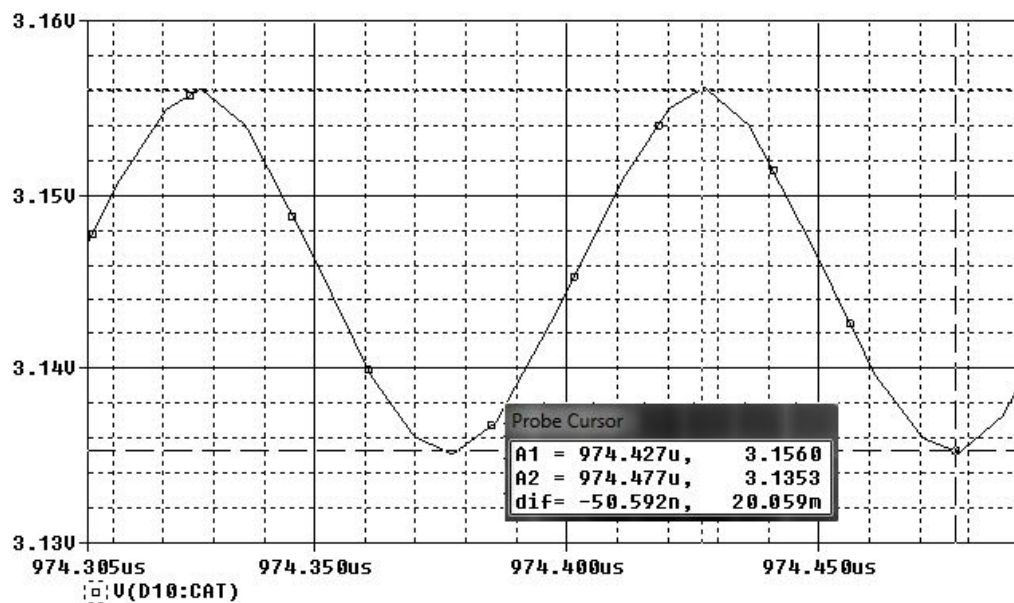


Figura 5.13 Multiplicador A: pormenor da onda de saída

Através da utilização de cursores foi então possível verificar qual o valor da tensão de ondulação, como se mostra nas figuras anteriores. Tendo ainda em conta os valores dos cursores, é possível calcular o valor médio do sinal de saída do multiplicador. Este valor médio será o valor médio da sinusóide apresentada na figura 5.13.

$$\{V_{out}\}_{med} = \frac{3.1560 + 3.1353}{2} = 3,145 \text{ V}$$

Tal como indicado na tabela, o valor de ganho do multiplicador foi calculado tendo em conta a expressão

$$X = \frac{\{V_{out}\}_{med}}{V_M}$$

Assim, para a primeira linha da tabela ter-se-á

$$X = \frac{\{V_{out}\}_{med}}{V_M} = \frac{3.145}{0.5} = 6.29$$

O valor de eficiência do multiplicador A, assim como dos restantes multiplicadores que serão apresentados, foi calculado tendo como base de comparação um multiplicador ideal, como já foi indicado. Desta forma, se o multiplicador A fosse ideal, com uma amplitude de entrada de 0.5 V, ter-se-ia um valor de saída de $\{V_{out}\}_{med_{ideal}} = 8 * 0.5 = 4 \text{ V}$.

Assim, pode então fazer-se

$$Ef (\%) = \frac{\{V_{out}\}_{med}}{\{V_{out}\}_{med_{ideal}}} * 100 = \frac{3.145}{4} * 100 = 78.6 \%$$

Outra forma de calcular a eficiência seria ter em conta o valor de ganho ideal e o valor de ganho obtido, o que obviamente iria dar o mesmo resultado.

Tendo em conta que nesta primeira fase de simulações se testa o multiplicador em vazio, isto é, sem nenhuma carga aplicada, não faz sentido calcular a corrente de saída nem a queda de tensão à saída do multiplicador. Esse cálculo será realizado quando se testarem os multiplicadores considerando uma carga, o que será efectuado no capítulo correspondente aos testes do sistema completo.

Como se pode observar pelos valores de eficiência obtidos, mesmo em simulação, pode esperar-se que o comportamento deste multiplicador esteja bastante longe do ideal. É de notar que na simulação as ligações entre componentes são consideradas ideais, pelo que a eficiência que o multiplicador apresenta se deve exclusivamente ao comportamento dos componentes a determinada frequência. Mesmo com modelos adequados a cada componente, espera-se que nos testes realizados ao multiplicador implementado, os resultados se deteriore. Além disso, é possível verificar, já na simulação, que quando se diminui a amplitude do sinal de entrada, a eficiência da conversão decai consideravelmente, uma vez que com amplitudes menores as perdas existentes nos diversos componentes se tornam mais importantes, podendo levar mesmo ao não funcionamento do multiplicador.

5.3.1.3 Multiplicador A – Resultados da implementação

A fim de validar o que aqui foi dito e as simulações feitas, foi então implementado o multiplicador presente na figura 5.10, já apresentada, e foram realizados diversos testes ao comportamento real do multiplicador. Como já foi referido, os testes foram realizados recorrendo a uma fonte sinusoidal de sinal cuja amplitude e frequência são ajustáveis. Os testes foram realizados também com o multiplicador em vazio, isto é, sem carga acoplada.

A tabela 5.2, mostrada de seguida, contém os resultados dos diversos testes realizados ao multiplicador A. Dadas as limitações do gerador de sinais utilizado, ao nível da frequência, fica agora justificado o porquê de se terem realizado simulações a frequências relativamente baixas (10 MHz e 20 MHz), quando comparadas com a frequência de trabalho do sistema. Estas simulações foram então realizadas para que se tenha um melhor termo de comparação entre os resultados obtidos nas simulações e os resultados obtidos nos testes ao multiplicador. Se os resultados das simulações e dos testes reais, às frequências comparáveis, forem semelhantes, então poder-se-á extrapolar acerca do comportamento do sistema à frequência de trabalho de 500 MHz, uma vez que não podem ser realizados testes a essa frequência, dada a inexistência de um gerador de sinais adequado. Desta forma pode-se avaliar então se a simulação do multiplicador está a apresentar resultados fiáveis.

V_M [V]	$V_{M,real}$ [V]	f [MHz]	$\{V_{out}\}_{med}$ [V]	$X = \frac{\{V_{out}\}_{med}}{V_M}$	δ [mV]	Ef (%)
0,5	0,472	0,5	2,72	5,44	56	68
	0,425	1	2,36	4,72	48	59
	0,4	2	1,52	3,04	40	38
	N/A	5	0	0	0	0
	N/A	10	0	0	0	0
	N/A	20	0	0	0	0
0,25	0,236	0,5	1,12	4,48	34	56
	0,208	1	0,94	3,76	36	47
	0,144	2	0,56	2,24	20	28
	N/A	5	0	0	0	0
	N/A	10	0	0	0	0
	N/A	20	0	0	0	0
0,125	0,116	0,5	0,4	3,2	30	40
	0,104	1	0,336	2,688	30	33,6
	0,076	2	0,188	1,504	20	18,8
	N/A	5	0	0	0	0
	N/A	10	0	0	0	0
	N/A	20	0	0	0	0

Tabela 5.2 Multiplicador A: resultados da implementação

Os dados presentes na tabela 5.2 cuja obtenção resultou de cálculo, nomeadamente o ganho de tensão e a eficiência, foram obtidos da mesma forma que se obtiveram aquando das simulações efectuadas ao multiplicador, portanto omite-se a explicação da sua obtenção.

Os restantes dados foram obtidos por análise da onda de saída do multiplicador através da utilização de um osciloscópio digital GDS-840C, da GW Instek, recorrendo a ferramentas de análise de sinais, disponibilizadas pelo osciloscópio. Por ser trivial, omite-se a explicação dessas ferramentas.

É fundamental fazer uma análise dos resultados obtidos, presentes na tabela 5.2, a fim de se poderem retirar conclusões acerca do real funcionamento do multiplicador A que, recorde-se, é um multiplicador Cockcroft-Walton de quatro níveis, implementado com diodos 1N5819 e condensadores de 100 nF numa placa de desenvolvimento com faixas de cobre e isolamento SRBP.

Em primeiro lugar, é necessário explicar o porquê de se terem dois sinais de entrada presentes na tabela como V_M e $V_{M_{real}}$. Dado que a fonte de sinal utilizada não é ideal, a existência de uma carga, neste caso o próprio multiplicador, vai alterar as características do sinal, mais especificamente a sua amplitude. Assim, considerando a operação em vazio, a fonte foi ajustada de forma a disponibilizar na saída o sinal pretendido. Por exemplo, para a primeira linha da tabela 5.2, a fonte foi ajustada para disponibilizar na sua saída um sinal de 0.5 V de amplitude e 0.5 MHz de frequência. Estas condições foram mantidas para todos os testes, isto é, em todos os testes a fonte, quando a operar em vazio, disponibilizava na sua saída um sinal cuja amplitude está presente na coluna um da tabela 5.2, V_M , e com a frequência correspondente. A segunda coluna da mesma tabela, $V_{M_{real}}$, contém o valor da amplitude do sinal sinusoidal efectivamente disponibilizado pela fonte, quando se liga esta ao multiplicador. Como se pode verificar existe uma queda de tensão que resulta da existência de uma resistência interna na fonte.

Em segundo lugar, é possível verificar que a eficiência do multiplicador, ou seja, o rendimento da conversão do sinal AC num sinal DC decai fortemente com o aumento da frequência, mesmo para frequências muito baixas, quando comparadas com a frequência de operação do sistema de recolha de energia electromagnética do ambiente, que recorde-se é de 500 MHz. Para as amplitudes de sinal de entrada apresentadas na tabela 5.2, o multiplicador não funciona para frequências superiores a 2 MHz. Para amplitudes superiores (por exemplo 5V), foi possível verificar que o multiplicador funcionava ainda nos 5 MHz, mas omitem-se esses dados, dado tratar-se de amplitudes de tensão que não se enquadram nas amplitudes reais em que o sistema vai operar. Este multiplicador está então fortemente limitado na frequência, pelo

que não funcionará à frequência de operação do sistema de recolha de energia. No entanto, irá ser feita uma comparação entre os resultados obtidos na simulação e os resultados obtidos nos testes ao multiplicador implementado, a fim de avaliar a própria qualidade da simulação e explicar as razões que levam à disparidade existente entre as simulações e os testes realizados ao multiplicador.

5.3.1.4 Multiplicador A – Comparação de resultados

Segue-se então uma comparação dos resultados obtidos nas simulações e nos testes efectuados ao multiplicador. Esta comparação, tanto para este multiplicador como para os restantes, avaliará a eficiência da conversão do sinal alternado num sinal contínuo, real e simulado, mas também o valor da tensão de ondulação presente no sinal de saída. É, no entanto, preciso referir que o valor de ondulação na saída, neste projecto específico, não é muito importante, uma vez que a existência de um regulador de tensão à saída do multiplicador irá linearizar o sinal eliminando as oscilações existentes. No entanto, e dado que para outras aplicações em que se dispense a utilização do regulador, o valor da tensão de ondulação pode ser importante, esta análise será aqui efectuada. Após a comparação dos resultados obtidos, apresentar-se-á uma breve conclusão sobre o funcionamento deste multiplicador.

Os gráficos seguintes, presentes na figura 5.14, contêm a comparação entre o valor médio do sinal de saída obtido na simulação, na implementação e o valor ideal, para as três amplitudes de sinal de entrada consideradas.

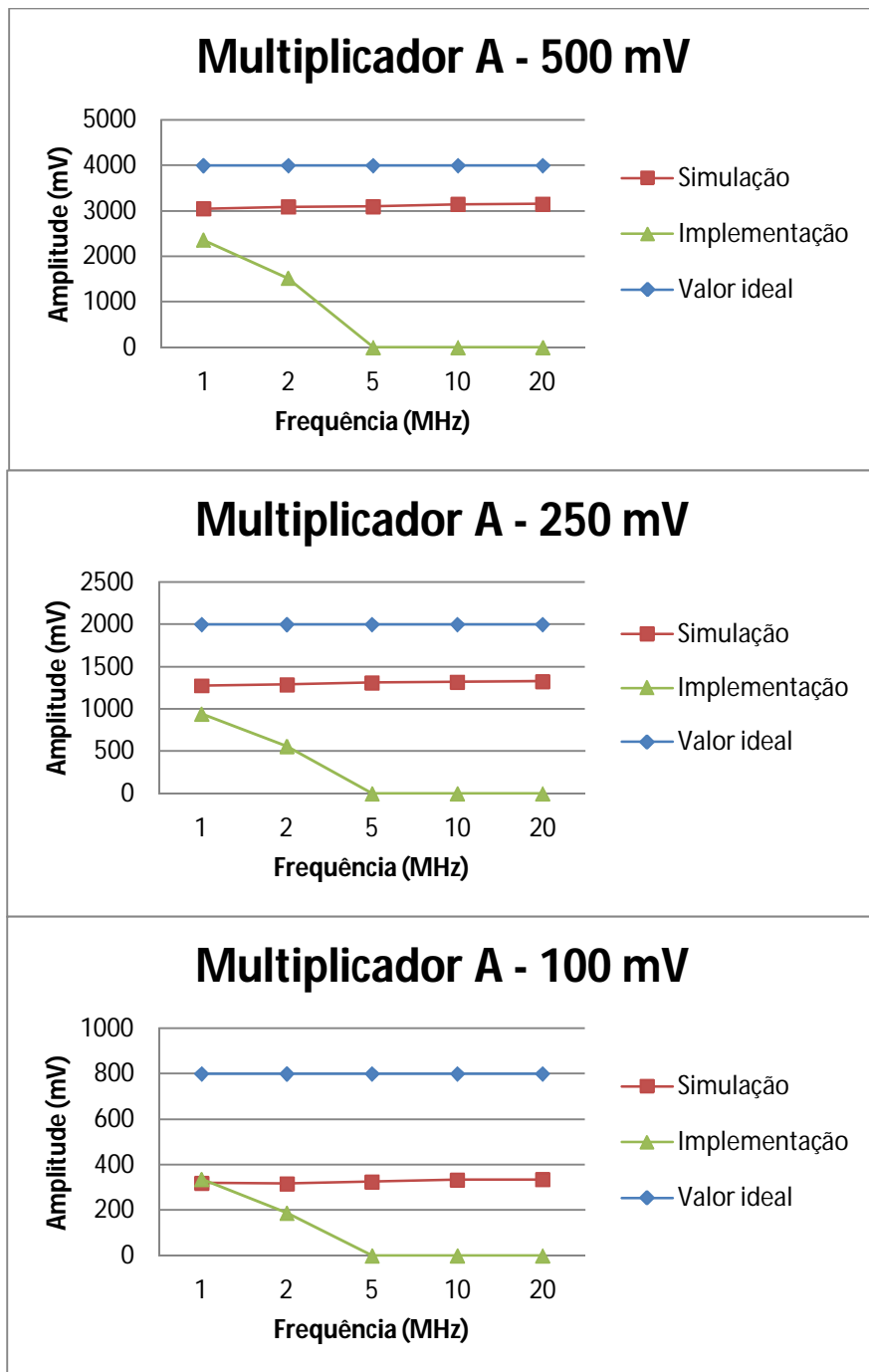


Figura 5.14 Multiplicador A: comparação de resultados

Analisando os gráficos presentes na figura 5.14, é possível concluir que o multiplicador A não funcionará às frequências desejadas. Trata-se de um multiplicador que pode ser utilizado apenas para baixas frequências. Este comportamento já era espectável, dado que nenhum dos componentes utilizados na implementação do multiplicador está projectado para o funcionamento a altas frequências. Tanto os condensadores como os díodos utilizados são de baixas frequências. No entanto, e dado que nas simulações os resultados eram encorajadores, implementou-se o multiplicador, obtendo-se os resultados agora apresentados.

Uma explicação para a grande diferença entre os resultados obtidos nas simulações e na implementação do circuito, deve-se ao facto de se ter utilizado uma placa com tiras de cobre e isolamento em SRBP, que está desenhada para funcionar apenas em baixas frequências. Lembre-se que no simulador todas as ligações entre os componentes são consideradas ideais, enquanto na implementação estas mesmas ligações estão longe do ideal. No entanto, e apesar desta explicação já apresentada, pode ainda afirmar-se que o modelo dos díodos 1N5819 utilizado pelo software está longe de ser ideal, uma vez que tais díodos não estão projectados para o funcionamento em altas frequências e o modelo aparenta não ter em conta este facto.

É ainda importante referir um outro aspecto. Como se pode verificar ainda na figura 5.14 e nas tabelas 5.1 e 5.2, com a diminuição da amplitude do sinal de entrada, as perdas existentes nos diversos componentes são cada vez mais importantes, levando a uma menor eficiência da conversão. Estas perdas, ocorridas tanto nos componentes como na própria placa de desenvolvimento de protótipos, são conhecidas como perdas de substrato e dependem da área dos componentes. Tanto os condensadores como os díodos são relativamente grandes, o que leva obviamente a uma quantidade de perdas consideráveis. Baixando o nível da tensão de entrada, estas perdas tornam-se então cada vez mais importantes e determinam elas próprias o incorrecto funcionamento do multiplicador. Também na placa existem perdas e a única forma de tentar evitar este tipo de perdas será minimizar a área de placa utilizada para a implementação do multiplicador, assim como recorrer à utilização de componentes de menores dimensões.

Devido a todos estes factos, está justificado o não funcionamento do multiplicador e a razão pela qual se optou pela implementação do multiplicador B, que será apresentado na secção seguinte.

No entanto, falta ainda analisar o comportamento do multiplicador A, referente ao valor da tensão de ondulação na sua saída. Como se pode verificar pela análise da tabela 5.1 e da figura 5.13, o valor da frequência de ondulação é o mesmo valor da frequência do sinal de entrada. No que toca à amplitude da tensão de ondulação, ela não depende da frequência mas sim apenas do valor da amplitude do sinal de entrada. Note-se que quando se fala em amplitude da tensão de ondulação, está-se na realidade a falar do valor pico a pico desta mesma tensão.

Ditas estas considerações, falta ainda analisar o comportamento do multiplicador real, face ao obtido em simulação, no que à tensão de ondulação diz respeito. A figura 5.15 contém um gráfico com a comparação dos valores de tensão de ondulação obtidos, tanto na simulação, como na implementação, para todas as amplitudes consideradas.

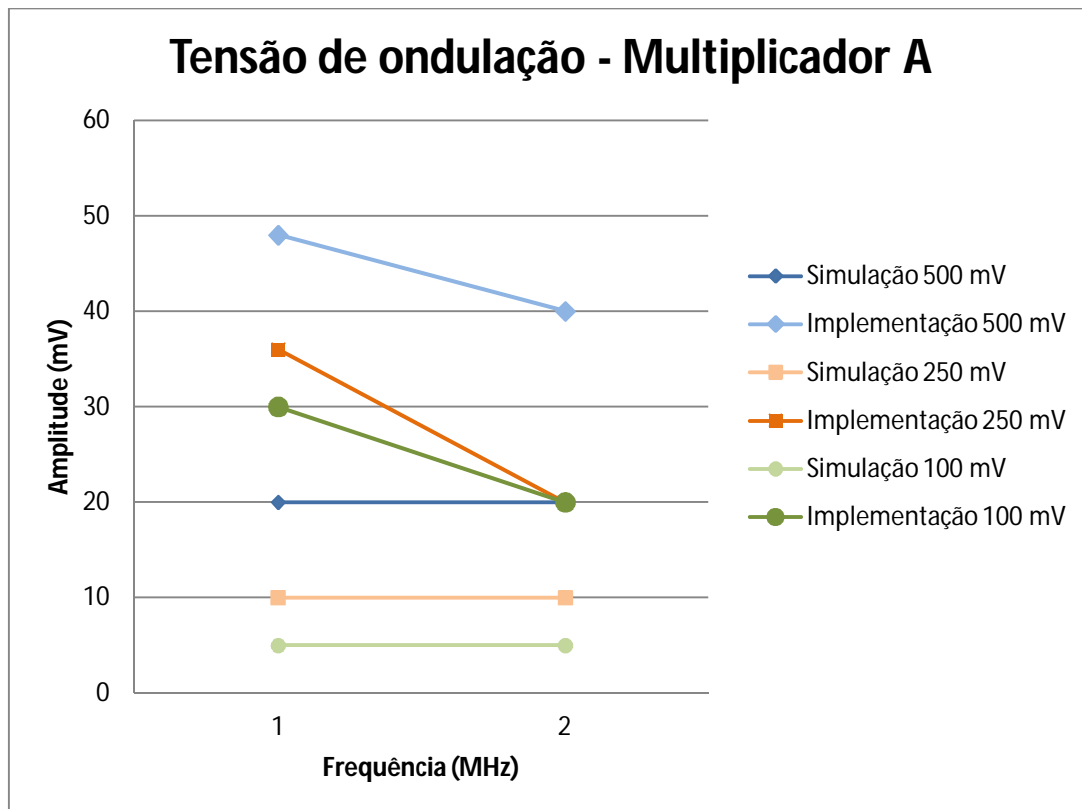


Figura 5.15 Multiplicador A: comparação das tensões de ondulação

Como se pode observar na figura 5.15, existe alguma disparidade nos resultados obtidos em simulação e na implementação do multiplicador para todos os valores de amplitude do sinal de entrada. Tal como seria de esperar, na implementação do multiplicador, o valor de tensão de ondulação é superior aquele que a simulação indica. Isto deve-se ao facto de na implementação os condensadores não terem um valor fixo e exactamente igual, como acontece na simulação. Além disso, existem diversas não linearidades na implementação do circuito e a própria fonte de alimentação não gera um sinal puramente sinusoidal. O ruído contido no sinal de entrada é amplificado, gerando também uma ondulação na saída.

Além disso, é possível verificar que apesar de na simulação o valor da tensão de ondulação não depender da frequência, tal facto não se verifica. Na realidade, como pode ser visto no gráfico, a tensão de ondulação depende da frequência. Isto também se deve ao facto de tanto os componentes como a própria fonte se comportarem de forma diferente a frequências diferentes.

5.3.2 Multiplicador Dickson de 4 níveis – “Multiplicador B”

Dado o incorrecto funcionamento do multiplicador anterior, foi simulado e implementado um novo multiplicador. Neste caso, optou-se pela implementação de um multiplicador Dickson, para se poder ter um elemento de comparação com a topologia Cockcroft-Walton, utilizada no multiplicador A.

5.3.2.1 Multiplicador B – Visão Geral

O multiplicador construído, denominado “multiplicador B”, é composto por quatro níveis de multiplicação. As figuras 5.16 e 5.17 mostram o multiplicador implementado, assim como o seu circuito eléctrico, que foi utilizado nas simulações.

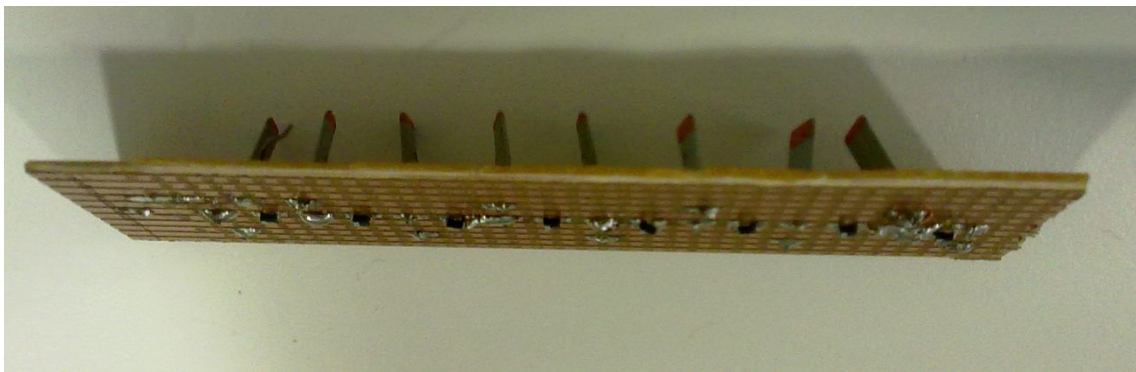


Figura 5.16 Multiplicador B: implementação

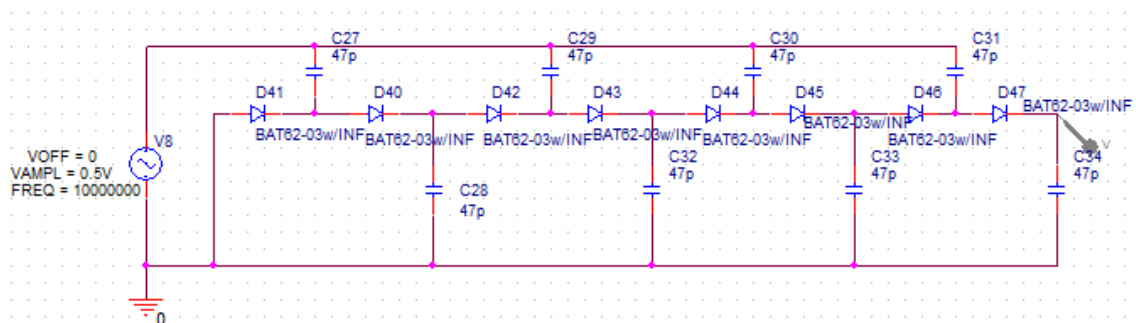


Figura 5.17 Multiplicador B: simulação

Como se pode verificar através da observação da figura 5.17, este multiplicador foi implementado recorrendo a condensadores cuja capacidade é de 47 pF. Tal como no caso anterior, optou-se por seguir a abordagem clássica, tendo todos os condensadores o mesmo valor. Os díodos utilizados neste multiplicador são BAT62-03W. Trata-se de um tipo de díodos cujo fabrico permite o funcionamento destes até frequências na ordem dos GHz, ou seja, são díodos de radiofrequência. Este tipo de díodos tem ainda uma capacitância muito inferior quando comparados com os anteriores (0.35 pF a 1 MHz, em vez de 120 pF também a 1MHz dos anteriores). Isto significa que os díodos não influenciarão a capacidade total do circuito, esperando-se assim que o comportamento do multiplicador seja mais próximo do desejável,

quando comparado com o multiplicador anterior. Dado que a influência dos díodos na capacidade total do circuito é muito menor, optou-se pela utilização de condensadores com uma capacidade menor, quando comparado com o caso anterior. Assim, neste multiplicador, todos os condensadores têm uma capacidade de 47 pF. No entanto, os condensadores utilizados ainda têm uma área elevada, pelo que se espera que se tenham algumas perdas. Além disso, o multiplicador foi implementado recorrendo ainda a uma placa com tiras de cobre e isolamento SRBP, pelo que se espera que também aqui haja algumas perdas. No entanto, e dado que os díodos agora utilizados são díodos de radiofrequência, preparados para operar até frequências bastante superiores à frequência de trabalho do sistema de recolha de energia electromagnética do ambiente, foi feita a simulação e implementação deste multiplicador. É de recordar que para o caso de um multiplicador de Dickson, a expressão 5.7, já demonstrada e novamente indicada de seguida, devolve a tensão de saída do multiplicador, em função dos parâmetros constituintes do mesmo e da tensão de entrada.

$$V_{out} = V_{in} + 2n * (V_{in} - V_D) [V]$$

De acordo com esta expressão, e considerando as características do multiplicador B, tem-se

$$V_{out} = V_{in} + 8 * (V_{in} - V_D) [V] \quad (5.9)$$

Desta forma, para calcular a tensão de saída do multiplicador, em determinadas condições, é necessário saber qual a queda de tensão associada aos díodos. Esta expressão tem como pressuposto que todos os díodos são iguais e, portanto, apresentam a mesma queda de tensão. Além disso, é preciso verificar que para frequências diferentes, os díodos podem comportar-se de forma diferente, pelo que a expressão 5.9 aqui enunciada, não reflecte o comportamento do multiplicador em qualquer situação, mas apenas numa situação específica, a funcionar a uma determinada frequência.

Atendendo ainda às expressões 5.5 e 5.6 note-se que V_R é a tensão de ondulação presente na saída do sistema. Tendo em consideração que o multiplicador será ensaiado em vazio, ou seja, sem carga aplicada, então ter-se-á $I_{out} = 0 A$, pelo que na teoria não existirá tensão de ondulação. No entanto, na prática isto pode não se verificar, pelo que será analisada a tensão de ondulação da saída do multiplicador.

5.3.2.2 Multiplicador B – Resultados da simulação

Para verificar a validade da expressão 5.9, procedeu-se então a uma série de simulações ao multiplicador, cujos resultados estão expressos na tabela 5.3, apresentada em seguida.

V_M [V]	f [MHz]	$\{V_{out}\}_{med}$ [V]	$X = \frac{\{V_{out}\}_{med}}{V_M}$	δ [mV]	Ef (%)
0,5	10	3,401	6,802	7,4	85,0
	20	3,415	6,83	7,4	85,4
	50	3,4	6,8	7,4	85,0
	100	3,346	6,692	7,4	83,7
	500	3,278	6,556	7,4	82,0
0,25	10	1,536	6,144	3,5	76,8
	20	1,537	6,148	3,5	76,9
	50	1,522	6,088	3,5	76,1
	100	1,48	5,92	3,5	74,0
	500	1,474	5,896	3,5	73,7
0,1	10	0,464	4,64	1,6	58,0
	20	0,459	4,59	1,6	57,4
	50	0,451	4,51	1,6	56,4
	100	0,424	4,24	1,6	53,0
	500	0,434	4,34	1,6	54,3

Tabela 5.3 Multiplicador B: resultados da simulação

Para a obtenção dos resultados presentes na tabela 5.3, procedeu-se da mesma forma que para a obtenção dos resultados referentes ao multiplicador A. Como já foi explicado o método utilizado para a obtenção desses mesmos resultados e, por se tratar de uma informação redundante, omite-se a explicação de como se obtiveram os dados presentes nesta tabela.

É de notar, no entanto, um valor de tensão de ondulação na saída relativamente baixo, quando comparado com o caso anterior. Isto deve-se ao facto de se terem utilizado condensadores cuja capacidade é substancialmente menor, pois recorde-se que o valor da tensão de ondulação depende, entre outras coisas, do valor de capacidade dos condensadores utilizados.

Para efeitos de justificação apresentam-se as figuras 5.18 e 5.19, que comprovam a veracidade dos dados constantes da tabela 5.3. Estas figuras são referentes aos dados presentes na primeira linha da tabela, sendo que para as restantes linhas se procedeu de igual forma. Tal como no caso do multiplicador A, os resultados foram calculados com base nas ferramentas disponíveis pelo software de simulação de circuitos eléctricos OrCAD, nomeadamente os cursores, através da análise da onda de saída do multiplicador. Esta onda de saída está então presente nas figuras 5.18 e 5.19.

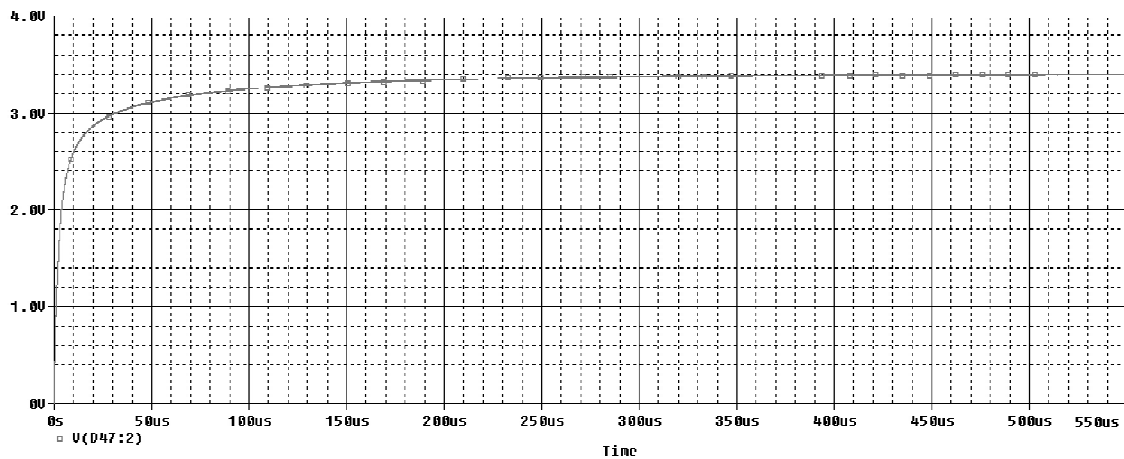


Figura 5.18 Multiplicador B: onda de saída

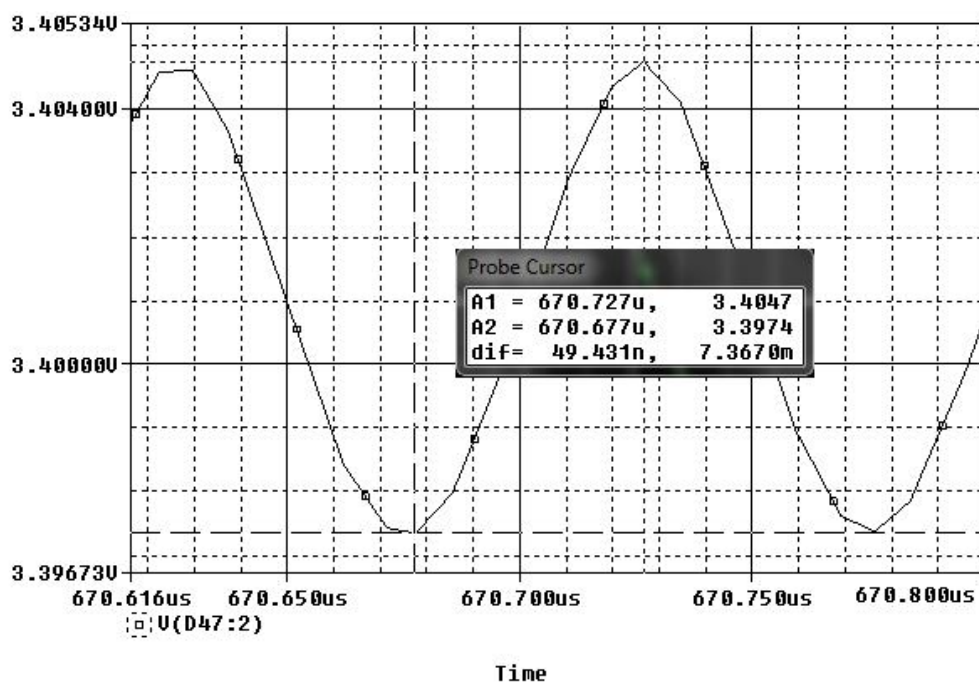


Figura 5.19 Multiplicador B: pormenor da onda de saída

Os resultados obtidos na simulação deste multiplicador, ao nível da eficiência da conversão da onda AC num sinal DC, são mais satisfatórios que no caso anterior. De acordo com as simulações realizadas, para uma amplitude de entrada de 0.5 V, os valores de eficiência da conversão RF para DC ultrapassam os 80%, comparando com a conversão de um multiplicador ideal, pelo que se esperam obter melhores resultados que no caso anterior, quando se analisar a implementação do multiplicador. No entanto, estes resultados não são muito superiores ao caso anterior, pelo que através da implementação deste multiplicador se poderá ter uma noção de qual a real diferença que faz a utilização de díodos de radiofrequência, preparados para funcionar às frequências desejadas.

5.3.2.3 Multiplicador B – Resultados da implementação

Tendo em conta o circuito utilizado para a simulação do multiplicador B, este foi implementado, obtendo-se o circuito já mostrado na figura 5.16. Como se pode verificar nesta mesma figura, os díodos utilizados têm uma área bastante menor, quando comparados com os díodos utilizados no multiplicador A. Recorde-se que se trata de díodos BAT62-03W para aplicações de radiofrequência. Estes díodos são projectados para construção de circuitos impressos ou montagens superficiais e o seu encapsulamento é do tipo SOD-323. As suas reduzidas dimensões levam a que se necessite bastante cuidado no seu manuseamento e na implementação do próprio multiplicador, de forma a manter os díodos em condições normais de funcionamento. Por exemplo, o processo de soldadura tem que ser efectuado com bastante cuidado, pois uma exposição excessiva ao calor facilmente destrói os díodos. Refira-se ainda que tal como os 1N5819, os BAT62-03W são díodos Schottky.

Implementado o multiplicador B, foram efectuados diversos testes para avaliar o funcionamento do circuito. Os testes foram efectuados nas mesmas condições que os já efectuados ao multiplicador A, isto é, recorrendo ao mesmo gerador de sinais para a geração da onda de entrada e mesmo osciloscópio para visualização do sinal de saída do multiplicador. Os testes efectuados estão contidos na tabela 5.4, mostrada de seguida.

V_M [V]	V_{Mreal} [V]	f [MHz]	$\{V_{out}\}_{med}$ [V]	$X = \frac{\{V_{out}\}_{med}}{V_M}$	δ [mV]	Ef (%)
0,5	0,488	0,5	2,38	4,76	30	59,5
	0,49	1	2,56	5,12	36	64
	0,492	2	2,56	5,12	40	64
	0,515	5	2,56	5,12	30	64
	0,56	10	2,44	4,88	30	61
	0,48	20	0,6	1,2	28	15
0,25	0,233	0,5	0,88	3,52	30	44
	0,234	1	0,92	3,68	34	46
	0,236	2	0,94	3,76	30	47
	0,2495	5	0,96	3,84	32	48
	0,268	10	0,9	3,6	40	45
	0,214	20	0,14	0,56	40	7
0,125	0,1175	0,5	0,32	2,56	40	32
	0,12	1	0,336	2,688	34	33,6
	0,122	2	0,44	3,52	30	44
	0,123	5	0,328	2,624	40	32,8
	0,144	10	0,33	2,64	34	33
	0,117	20	0,05	0,4	30	5

Tabela 5.4 Multiplicador B: resultados da implementação

A análise da tabela 5.4 pode levar a diversas conclusões, que devem ser referidas. No entanto, antes de analisar os dados presentes nesta mesma tabela, é necessário dizer que todos os

dados aqui presentes e que necessitaram cálculo, foram calculados de igual forma aos casos anteriores, pelo que não se apresentam estes mesmos cálculos.

Como se pode verificar na segunda coluna da tabela 5.4, também este multiplicador afecta o sinal gerado pela fonte, mais especificamente a sua amplitude. Como já foi referido, isto deve-se ao facto da fonte não ter um comportamento ideal perante a carga a ela aplicada. Foi analisado o comportamento do multiplicador a diversas frequências, sendo registado o ganho de tensão que o multiplicador apresenta em cada uma dessas frequências. Comparando o ganho do multiplicador com o ganho de um multiplicador ideal, é possível obter a eficiência presente na última coluna da referida tabela.

Pela análise da tabela conclui-se ainda que este multiplicador funciona em todas as frequências testadas, embora para a maior frequência em que foi possível efectuar testes, 20 MHz, a eficiência do multiplicador seja bastante reduzida. Isto indica que o multiplicador, tal como o anterior, não deverá funcionar à frequência de trabalho do sistema de recolha de energia do ambiente. No entanto, antes de se retirarem mais conclusões, vai ser feita uma comparação entre os resultados obtidos na simulação e na implementação deste multiplicador.

5.3.2.4 Multiplicador B – Comparação de resultados

Tal como no caso anterior, a comparação de resultados do multiplicador B inclui uma comparação dos valores médios obtidos no sinal de saída do multiplicador, em simulação e nos testes realizados com o multiplicador implementado. É ainda incluída uma comparação dos diversos valores obtidos para a tensão de ondulação, tanto em simulação como na implementação do circuito. A figura 5.20 inclui dois gráficos que apresentam a comparação dos resultados às amplitudes consideradas mais importantes.

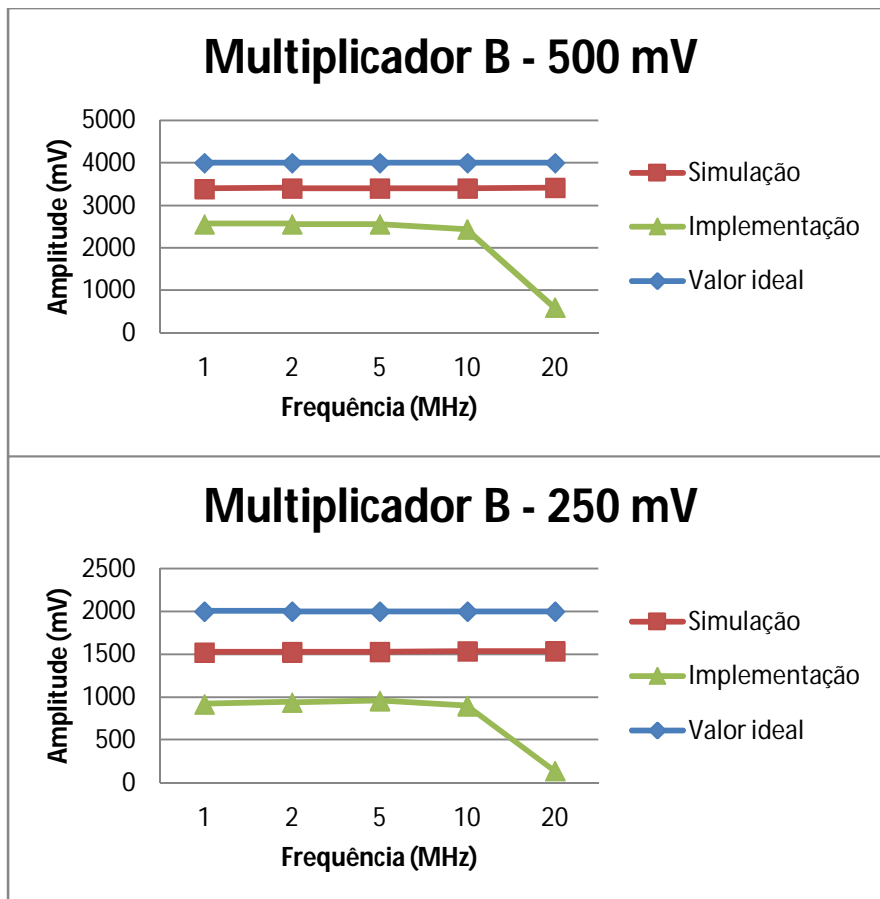


Figura 5.20 Multiplicador B: comparação de resultados

No caso deste multiplicador, optou-se por não se fazer uma comparação dos valores obtidos quando a onda de entrada tem uma amplitude de 0.1V, uma vez que esse valor se encontra já afastado do valor que supostamente se encontra disponível para recolher do ambiente. No entanto, os dados referentes a estes testes estão presentes nas tabelas 5.3 e 5.4, pelo que poderão aí ser analisados.

Como facilmente se verifica na figura 5.20, o multiplicador B, tal como o anterior, não se comporta de forma muito semelhante ao comportamento obtido na simulação. Estando os díodos utilizados preparados para o funcionamento a frequências bastante elevadas e bastante superiores àquelas em que se efectuaram testes, o incorrecto funcionamento do circuito só se poderá dever aos condensadores utilizados, assim como à placa em que o circuito foi implementado. Mais uma vez, tenha-se em atenção que o simulador considera os condensadores como ideais, isto é, sem perdas de substrato e com um valor de capacidade exactamente igual ao descrito. Também no que se refere à placa de implementação do circuito, o simulador considera todas as ligações entre componentes como ideais, não tendo em conta as diversas perdas que ocorrem na placa.

Através da análise da tabela 5.2 e da figura 5.20, é possível verificar que quanto menor for a amplitude do sinal de entrada do multiplicador, menor será a eficiência da conversão. Este decaimento da eficiência da conversão também se deve ao facto das perdas existentes nos diversos componentes e nas ligações serem mais importantes, quando se consideram amplitudes de tensão de entrada menores.

Por fim, através da análise da figura 5.20, pode concluir-se que este multiplicador também não funcionará às frequências desejadas. Apesar de funcionar em todas as frequências testadas, para os 20 MHz a eficiência da conversão é já muito baixa, pelo que se espera que não funcione a frequências superiores. Olhando apenas para os resultados das simulações, o multiplicador funciona nos 500 MHz, mas os resultados obtidos nos testes efectuados ao multiplicador implementado, nomeadamente o decaimento tão significativo da eficiência à frequência de apenas 20 MHz, permite concluir que o multiplicador não irá funcionar como desejado. Este funcionamento incorrecto deve-se obviamente ao facto de tanto os condensadores como a placa de desenvolvimento de protótipos em que o multiplicador foi implementado não estarem preparados para funcionar a altas frequências.

Mais uma vez, verifica-se então uma não convergência entre os resultados obtidos na simulação do circuito e na sua implementação, já justificada nos parágrafos anteriores. Antes de se passar à análise de um novo multiplicador, é ainda importante verificar as diferenças registadas em simulação e na implementação do multiplicador, referentes ao valor da tensão de ondulação registada no multiplicador.

Recorde-se que devido ao facto de não existir carga no multiplicador, teoricamente o valor da tensão de ondulação será zero. No entanto, mesmo em simulação, pode verificar-se que tal facto não se concretiza. A figura 5.21 contém então uma comparação entre os valores da tensão de ondulação obtidos na simulação e na implementação do circuito.

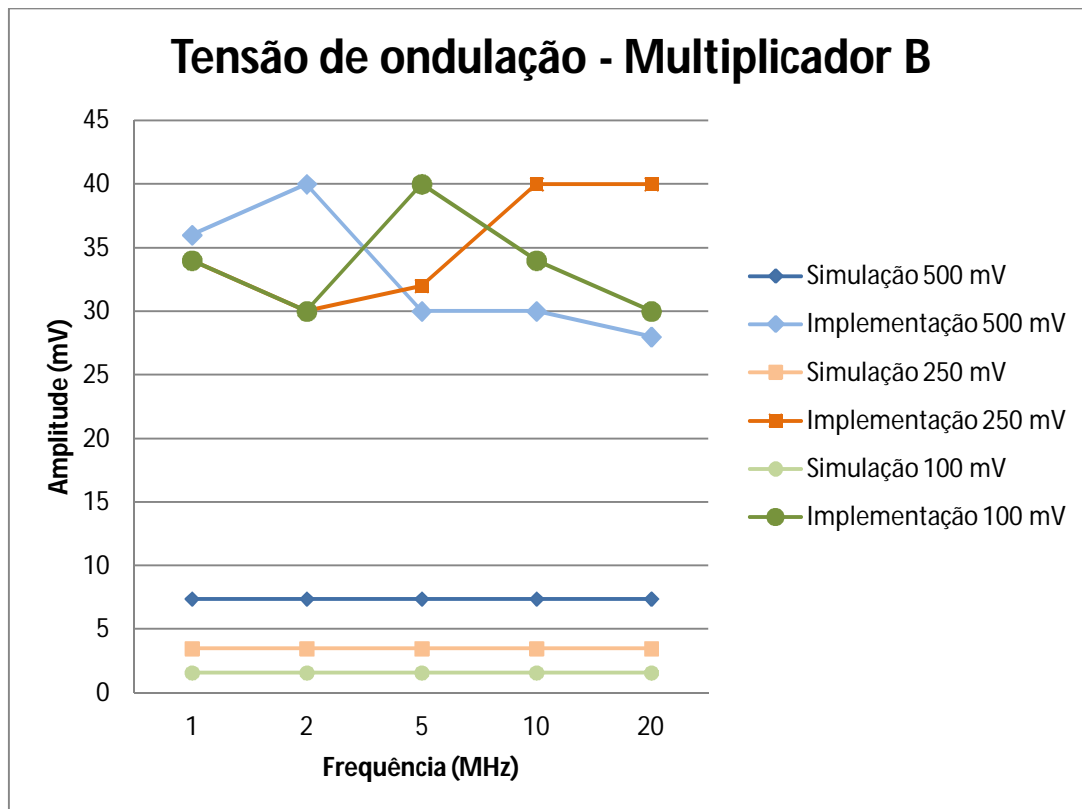


Figura 5.21 Multiplicador B: comparação das tensões de ondulação

Como é facilmente verificável, os valores da tensão de ondulação obtidos na implementação do circuito são bastante superiores àqueles obtidos quando o circuito foi simulado. Apesar de em simulação este valor não depender da frequência, tal não pode ser verificado na implementação do circuito, pois para frequências diferentes obtém-se um valor de tensão de ondulação diferente. No entanto, como pode ainda ser observado, os valores da tensão de ondulação obtidos nos testes realizados ao circuito implementado estão contidos numa gama relativamente pequena de valores de tensão (entre os 30 mV e os 40 mV), o que indica que mesmo aqui, a variação com a frequência não será elevada.

Por fim, é preciso ter em conta determinados aspectos, que na implementação são fundamentais, e facilmente serão justificáveis das diferenças obtidas nos diversos resultados. O facto de a fonte não ser ideal, e produzir um sinal com ruído, as diferenças entre os diversos componentes constituintes do circuito que na implementação realizada não possuem exactamente as mesmas características e as não linearidades existentes na placa em que o circuito foi implementado justificam esta diferença de resultados.

Em suma, o multiplicador Dickson de quatro níveis aqui implementado, denominado neste documento como multiplicador B, tem um comportamento longe do esperado e não funciona da forma desejada à frequência de trabalho do sistema de recolha de energia do ambiente.

5.3.3 Multiplicador Dickson de quatro níveis – “Multiplicador C”

Dado que o multiplicador B, cujos resultados se apresentaram na secção anterior, tem um comportamento longe do desejado, foi implementado um novo multiplicador de tensão. Este multiplicador, identificado como multiplicador C, é um multiplicador que segue a topologia Dickson, de quatro níveis, em semelhança com o anterior, mas com diversas diferenças que serão apresentadas ao longo desta secção.

5.3.3.1 Multiplicador C – Visão geral

A implementação e circuito eléctrico do multiplicador C encontram-se ilustrados nas figuras 5.22 e 5.23, respectivamente.

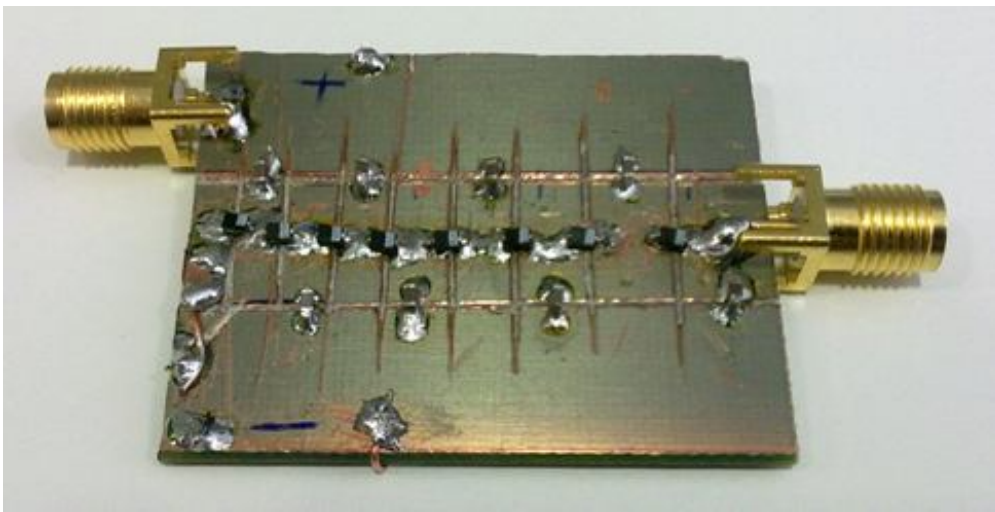


Figura 5.22 Multiplicador C: implementação

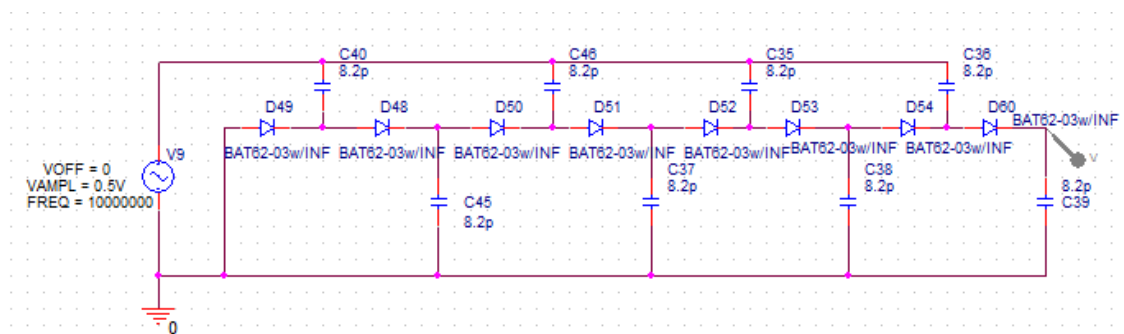


Figura 5.23 Multiplicador C: simulação

Como se pode facilmente observar na figura 5.23, trata-se de um multiplicador que segue a topologia Dickson de quatro níveis. Dado serem díodos cujas características garantem o seu correcto funcionamento, à frequência de trabalho do sistema de recolha de energia, mantiveram-se os BAT62-03W, já utilizados no multiplicador anterior. Os condensadores utilizados são todos iguais, cumprindo com as especificações clássicas dos multiplicadores de tensão e têm uma capacidade de 8.2 pF. Este valor de capacidade relativamente pequeno é adequado para o

funcionamento em altas frequências e, dado que neste sistema o valor da tensão de ondulação existente à saída do multiplicador não é importante, pode ser utilizado.

Analisando a figura 5.22, são óbvias as diferenças deste multiplicador, face aos anteriores. Os condensadores utilizados são bastante mais pequenos, o que só por si deverá levar a uma menor quantidade de perdas. Além disso, utiliza-se uma placa de desenvolvimento de protótipos FR4 com dupla face. Este tipo de placas está desenhado para o desenvolvimento de circuitos de radiofrequência, pelo que deve assegurar um mais correcto funcionamento do multiplicador.

Dado tratar-se de um multiplicador cuja topologia é semelhante ao anterior, também aqui se pode aplicar a expressão 5.9, já demonstrada.

$$V_{out} = V_{in} + 8 * (V_{in} - V_D)$$

De acordo com esta expressão, poderá nunca se atingir o valor de ganho ideal de 8, mas espera-se que se consiga obter um resultado bastante próximo daquele que a expressão indica. É necessário ter em consideração o valor de queda de tensão nos díodos, mas este valor depende da frequência em que se está a operar pelo que não se efectua nas simulações a verificação desta expressão. Esta expressão será no entanto verificada, quando se efectuar uma comparação dos diversos multiplicadores.

5.3.3.2 Multiplicador C – Resultados da simulação

Como primeira forma de verificação dos resultados do multiplicador, foram feitas diversas simulações cujos resultados se encontram contidos na tabela 5.5.

V_M [V]	f [MHz]	$\{V_{out}\}_{med}$ [V]	$X = \frac{\{V_{out}\}_{med}}{V_M}$	δ [mV]	Ef (%)
0,5	10	2,99	5,98	39	74,8
	20	2,99	5,98	39	74,8
	50	2,98	5,96	39	74,5
	100	2,97	5,94	39	74,3
	500	2,92	5,84	39	73,0
0,25	10	1,315	5,26	20	65,8
	20	1,32	5,28	20	66,0
	50	1,315	5,26	20	65,8
	100	1,31	5,24	20	65,5
	500	1,275	5,1	20	63,8
0,1	10	0,375	3,75	8	46,9
	20	0,379	3,79	8	47,4
	50	0,378	3,78	8	47,3
	100	0,375	3,75	8	46,9
	500	0,362	3,62	8	45,3

Tabela 5.5. Multiplicador C: resultados da simulação

Os resultados presentes na tabela 5.5 foram obtidos com o mesmo procedimento que nos casos anteriores, pelo que se considera dispensável uma explicação da forma como os mesmos foram conseguidos. No entanto, como forma de validação destes mesmos resultados mostram-se as figuras 5.24 e 5.25, que contêm a onda de saída do multiplicador referente às condições indicadas na primeira linha da tabela. É possível verificar nestas imagens tanto o valor da tensão de saída, como o valor da tensão de ondulação.

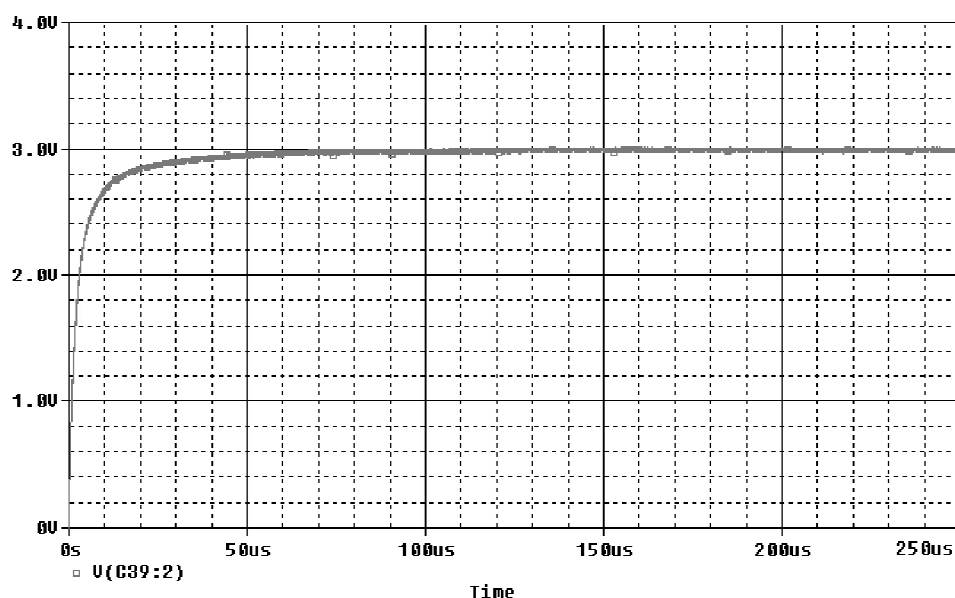


Figura 5.24 Multiplicador C: onda de saída

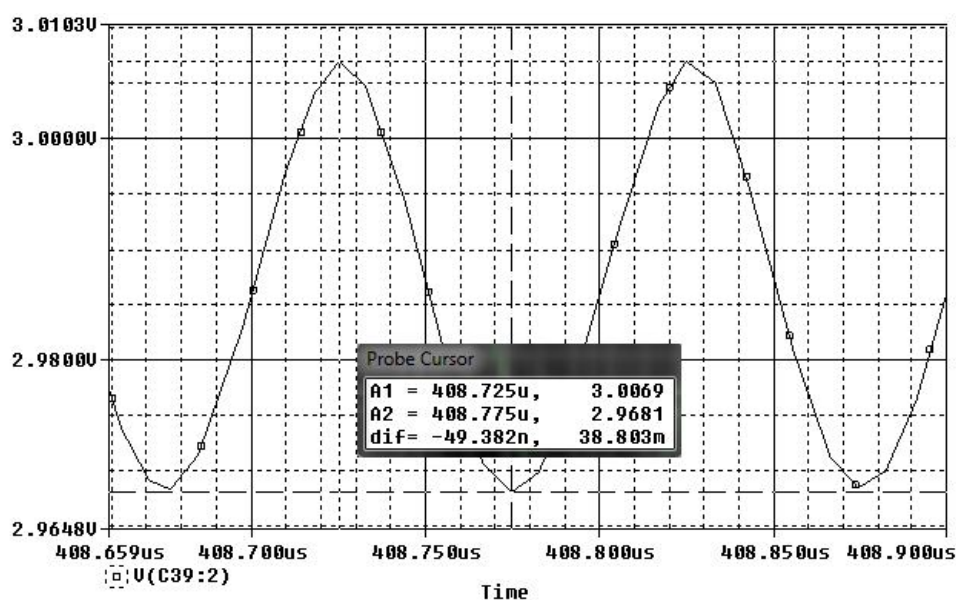


Figura 5.25 Multiplicador C: pormenor da onda de saída

Os resultados obtidos nesta simulação vêm na mesma linha dos anteriores, tendo em conta as particularidades da simulação, por exemplo o facto de considerar as ligações ideais, como já se referiu.

5.3.3.3 Multiplicador C – Resultados da implementação

A implementação do multiplicador C está ilustrada na figura 5.22, como já foi referido. A utilização de componentes preparados para funcionar em altas frequências, assim como o facto de se utilizar uma placa de desenvolvimento de FR4, também preparada para o funcionamento em altas frequências, permitem prever um funcionamento do multiplicador de acordo com as especificações e resultados obtidos em simulação.

Para a verificação destes mesmos resultados, foi efectuado um conjunto de testes ao multiplicador C. Os testes realizados, que constituem a tabela 5.6, foram realizados nas mesmas condições e com o mesmo material que os testes anteriormente realizados aos outros multiplicadores, pelo que as diferenças de resultados se devem exclusivamente ao diferente comportamento dos multiplicadores.

V_M [V]	V_{Mreal} [V]	f [MHz]	$\{V_{out}\}_{med}$ [V]	$X = \frac{\{V_{out}\}_{med}}{V_M}$	δ [mV]	Ef (%)
0,5	0,464	0,5	0,91	1,82	26	22,8
	0,468	1	1,222	2,444	28	30,6
	0,475	2	1,43	2,86	30	35,8
	0,495	5	1,5	3	30	37,5
	0,532	10	1,44	2,88	34	36,0
	0,44	20	1,48	2,96	34	37,0
0,25	0,27	0,5	0,444	1,776	26	22,2
	0,272	1	0,6	2,4	22	30,0
	0,276	2	0,668	2,672	24	33,4
	0,288	5	0,71	2,84	30	35,5
	0,305	10	0,664	2,656	32	33,2
	0,244	20	0,67	2,68	32	33,5
0,125	0,125	0,5	0,144	1,152	20	14,4
	0,128	1	0,189	1,512	20	18,9
	0,133	2	0,204	1,632	20	20,4
	0,142	5	0,212	1,696	18	21,2
	0,152	10	0,208	1,664	22	20,8
	0,122	20	0,206	1,648	28	20,6

Tabela 5.6 Multiplicador C: resultados da implementação

Os resultados aqui presentes, como já foi referido, foram conseguidos nas mesmas condições dos anteriores, pelo que se omite quaisquer cálculos que foram efectuados para o preenchimento da tabela. Mais uma vez é fundamental referir que estes resultados foram obtidos considerando o multiplicador a operar em vazio.

Analisando os resultados presentes na tabela 5.6, chega-se à conclusão que este multiplicador possui uma eficiência na conversão AC-DC relativamente baixa. No entanto, é fundamental salientar que o multiplicador funciona de forma semelhante em todas as

frequências testadas, não perdendo eficácia à medida que se aumenta a frequência do sinal de entrada. Os valores de tensão de ondulação obtidos apresentam-se numa gama aceitável.

5.3.3.4 Multiplicador C – Comparação entre simulação e implementação

Para avaliar o desempenho do multiplicador, mais uma vez são comparados os resultados obtidos em simulação e os resultados obtidos nos testes realizados ao circuito multiplicador implementado. Tal como no caso do multiplicador anterior, não se comparam os dados referentes a uma tensão de entrada cuja amplitude é de 0.1 V, dado tratar-se de uma amplitude cujo valor se encontra já afastado do valor da amplitude de entrada da tensão no sistema de recolha de energia, do qual o multiplicador faz parte.

A figura 5.26, ilustrada em baixo, mostra dois gráficos que permitem facilitar a comparação dos dados obtidos em simulação e na implementação, para os casos em que a amplitude do sinal de entrada é de 0.5 V e 0.25 V.

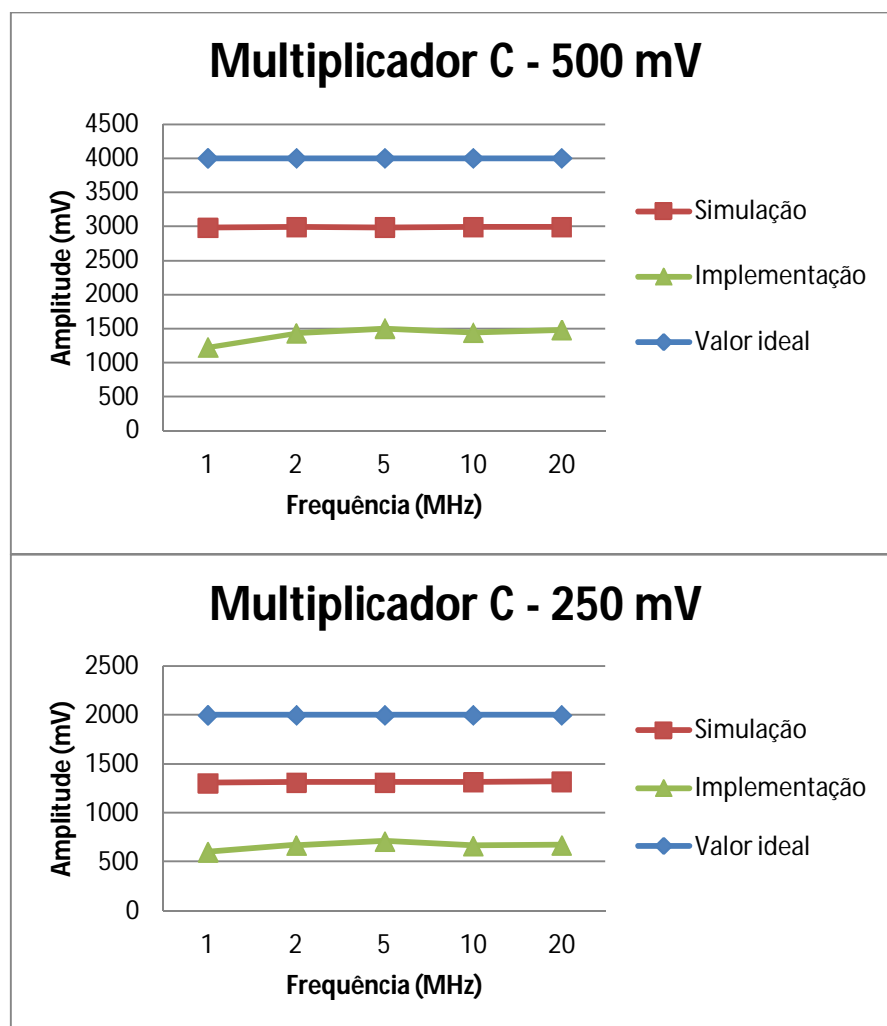


Figura 5.26 Multiplicador C: comparação de resultados

Como se pode verificar pela análise da figura 5.26, o funcionamento real do multiplicador está um pouco afastado do comportamento obtido em simulação. No entanto, é de salientar que aparentemente o comportamento do multiplicador se mantém com o aumento da frequência. Tendo em conta que em simulação, para uma determinada amplitude, a eficiência da conversão AC-DC se mantém praticamente constante com o aumento da frequência e, dado que os componentes utilizados para implementar o multiplicador estão preparados para um funcionamento em altas frequências, espera-se que este multiplicador possa funcionar à frequência de trabalho do sistema de recolha de energia. A corroborar esta afirmação está ainda o facto de, para as frequências em que foi possível testar, o multiplicador não perder eficiência com o aumento da frequência.

A diferença de valores de eficiência obtidos na implementação e na simulação do circuito deve-se às perdas existentes no circuito implementado. Este multiplicador foi implementado utilizando componentes para funcionamento em alta frequência, tal como uma placa de desenvolvimento de protótipos que está desenhada para funcionar em altas frequências. A uma frequência de trabalho baixa, o comportamento destes materiais pode ser ligeiramente diferente, o que pode levar à existência de perdas. No entanto, o aspecto que se considera fundamental para a existência das perdas é a própria implementação do circuito. Este circuito foi implementado e soldado à mão, como se pode verificar na figura 5.22. Isto leva a que existam diversas perdas no circuito. As ligações entre os componentes estão longe de ser ideais e o processo de soldadura pode facilmente degradar algum dos componentes, degradando assim o comportamento do circuito. Isto acontece porque devido ao pequeno tamanho dos diversos componentes, um tempo de exposição demasiado longo (apenas alguns segundos) ao calor libertado na soldadura poderá degradar as características dos componentes.

No entanto, e, considerando os aspectos negativos já indicados, o multiplicador C tem um comportamento dentro do esperado, no que se refere ao valor médio da tensão de saída do mesmo.

Para terminar a comparação entre o circuito implementado e os resultados obtidos em simulação, considere-se a figura 5.27, que contém uma comparação entre os valores de tensão de ondulação no sinal de saída, para os diversos casos.

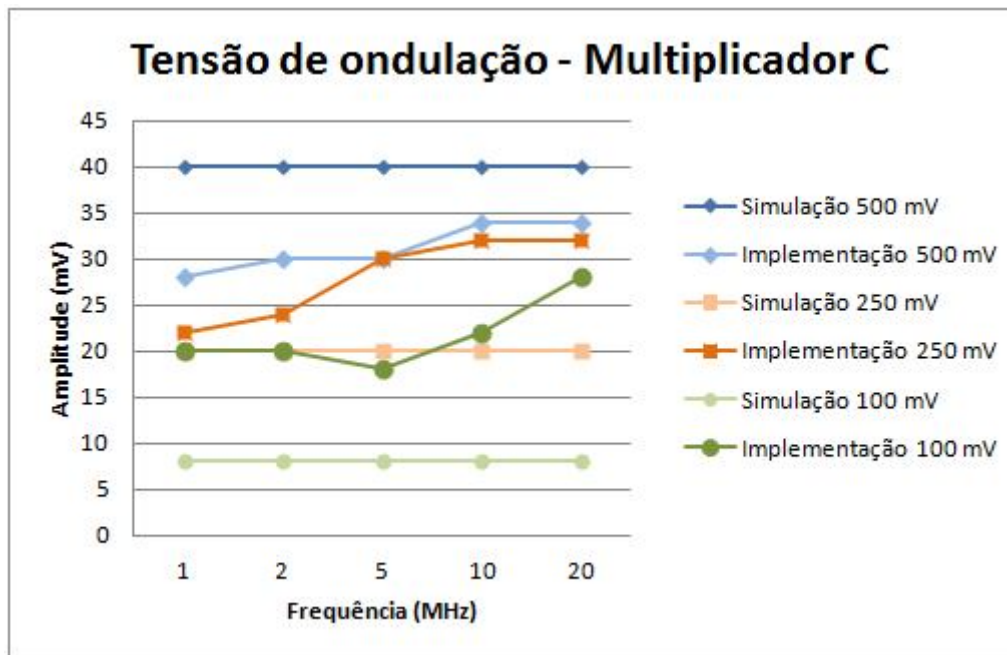


Figura 5.27 Multiplicador C: tensões de ondulação

Como se pode verificar pela análise da figura 5.27, os valores de tensão de ondulação obtidos no multiplicador C encontram-se numa gama aceitável. É de salientar que para um sinal de entrada com 0.5 V de amplitude, os valores da tensão de ondulação obtidos na implementação do circuito são até inferiores aos resultados obtidos em simulação, o que anuncia ser um factor indicativo do correcto funcionamento do multiplicador e dos seus constituintes. Tal como nos casos dos multiplicadores anteriores, os valores da tensão de ondulação obtidos no circuito implementado dependem da frequência, ao contrário do que acontece nas simulações, mas a sua variação é relativamente pequena, pelo que se atribui esta mesma variação às não linearidades existentes tanto no circuito como na fonte geradora de sinal utilizada.

Em suma, dados os resultados aqui obtidos e apresentados, o comportamento do multiplicador C, apresenta-se dentro do esperado. A comparação entre os resultados obtidos nas simulações e em testes ao circuito implementado permite prever que este circuito multiplicador possa funcionar à frequência de operação do sistema de recolha de energia.

No entanto, e de acordo com as especificações do sistema de energia, é preciso ter à saída do multiplicador um valor de tensão que ultrapasse os 2 V, de forma a possibilitar o correcto funcionamento do regulador de tensão existente. Como se pode observar pela análise dos resultados obtidos, a baixa eficiência na conversão AC-DC conseguida com este multiplicador não permite que se atinjam os valores de tensão desejados, pelo que se considerou a implementação dum quarto e último multiplicador, cujas especificações e resultados se apresentam na secção seguinte.

5.3.4 Multiplicador Dickson de oito níveis – “Multiplicador D”

Dado que o multiplicador anterior, apesar de ter dado indicações positivas de funcionar à frequência desejada, não é suficiente para elevar o valor de tensão ao nível desejado, foi simulado e implementado um novo multiplicador de Dickson, de oito níveis. Teoricamente, este multiplicador deverá ser capaz de elevar 16 vezes o valor da tensão de entrada, no entanto, devido aos diversos problemas já observados nos casos anteriores, com ênfase no multiplicador C, não se espera obter um valor dessa ordem de grandeza.

5.3.4.1 Multiplicador D – Visão Geral

As figuras 5.28 e 5.29 contêm a implementação do multiplicador D e o respectivo circuito eléctrico, utilizado para as simulações.

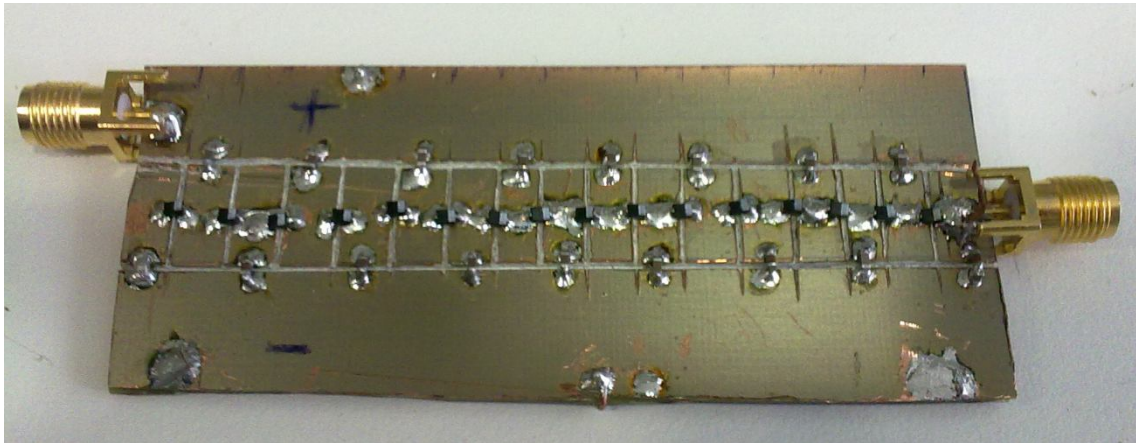


Figura 5.28 Multiplicador D: implementação

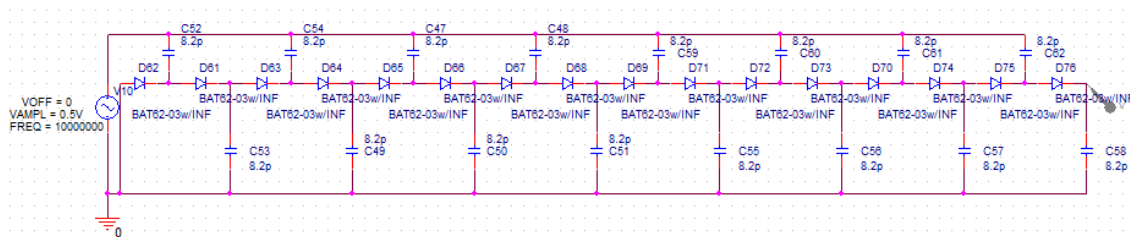


Figura 5.29 Multiplicador D: circuito eléctrico para simulação

Como se pode verificar nas figuras anteriores, este multiplicador é bastante semelhante ao anterior, sendo utilizados componentes iguais. A única diferença reside exactamente no número de níveis existentes em cada um destes multiplicadores. A fim de se conseguir ter à saída dos multiplicadores o valor de tensão desejado, simulou-se e implementou-se este multiplicador, semelhante ao anterior, mas com mais níveis de multiplicação.

À primeira vista espera-se que com este multiplicador se consiga obter o nível de tensão desejado. No entanto, e, dados os componentes serem iguais aos anteriores, espera-se desde já um valor relativamente baixo na eficiência da conversão AC-DC, mesmo inferior ao anterior, dado que sendo o circuito maior, as perdas existentes serão mais significativas.

5.3.4.2 Multiplicador D – Resultados da simulação

Como primeira forma de avaliar os resultados atingidos por este multiplicador, o circuito presente na figura 5.29 foi simulado utilizando o software OrCAD PSPICE e os resultados obtidos estão presentes na tabela 5.7.

V_M [V]	f [MHz]	$\{V_{out}\}_{med}$ [V]	$X = \frac{\{V_{out}\}_{med}}{V_M}$	δ [mV]	Ef (%)
0,5	10	5,94	11,88	38	74,3
	20	5,92	11,84	38	74,0
	50	5,87	11,74	38	73,4
	100	5,88	11,76	38	73,5
	500	5,745	11,49	38	71,8
0,25	10	2,604	10,416	19	65,1
	20	2,606	10,424	19	65,2
	50	2,59	10,36	19	64,8
	100	2,59	10,36	19	64,8
	500	2,52	10,08	19	63,0
0,1	10	0,739	7,39	8	46,2
	20	0,742	7,42	8	46,4
	50	0,738	7,38	8	46,1
	100	0,736	7,36	8	46,0
	500	0,729	7,29	8	45,6

Tabela 5.7. Multiplicador D: resultados da simulação

Os resultados obtidos na simulação do multiplicador D, aqui contidos na tabela 5.7, foram conseguidos da mesma forma que os resultados referentes aos multiplicadores anteriores, pelo que se considera desnecessária uma explicação exaustiva sobre os procedimentos efectuados para a obtenção destes resultados.

Ao nível da eficiência da conversão, a simulação deste multiplicador encontra-se na mesma ordem de grandeza que os anteriores, esperando-se portanto que na implementação os resultados obtidos também sejam semelhantes. Mais uma vez se verifica que é expectável que a eficiência da conversão baixe à medida que se diminui a amplitude do sinal de entrada. Isto demonstra que o software de simulação tem em conta as perdas dos diversos componentes, que se tornam mais importantes à medida que diminuem os valores de tensão envolvidos.

As figuras 5.30 e 5.31, apresentadas no próximo parágrafo, demonstram a validade dos dados presentes na tabela 5.7. Estas contêm o sinal de saída do multiplicador, nas condições

referentes à primeira linha da tabela, isto é, com um sinal de entrada de 0.5 V de amplitude e uma frequência de 10 MHz.

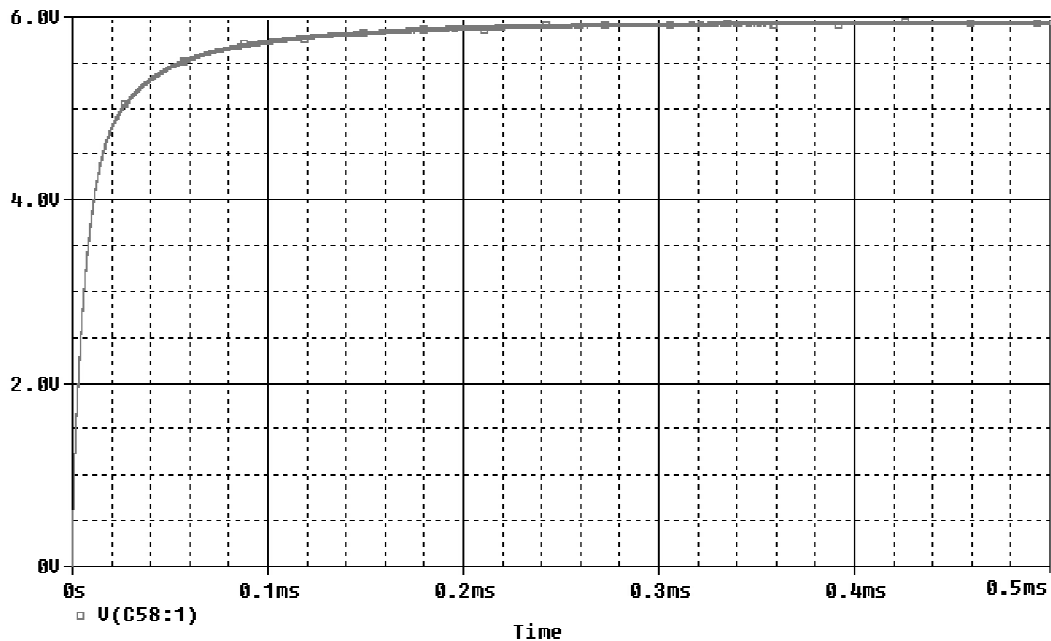


Figura 5.30 Multiplicador D: onda de saída

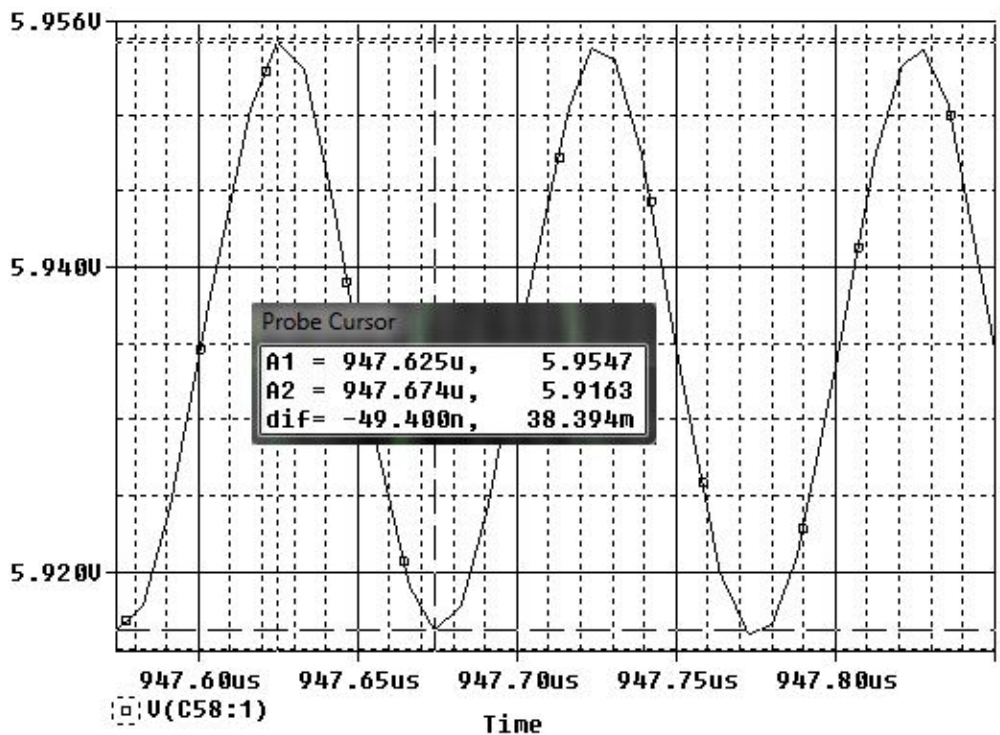


Figura 5.31 Multiplicador D: pormenor da onda de saída

Como se pode verificar nas imagens anteriores, a utilização de cursores mais uma vez permitiu a obtenção de dados exactos para o preenchimento da tabela 5.7, apresentada atrás.

5.3.4.3 Multiplicador D – Resultados da implementação

Com os resultados obtidos no multiplicador anterior e com resultados já obtidos na simulação do multiplicador D, implementou-se este mesmo multiplicador. O circuito implementado está ilustrado na figura 5.28, já apresentada.

Os diversos resultados obtidos permitem prever que o funcionamento deste multiplicador seja adequado para o sistema de recolha de energia. Apesar de se esperar uma eficiência na conversão AC-DC relativamente baixa, os níveis de tensão obtidos no multiplicador anterior, em conjunto com a semelhança nas eficiências das simulações de ambos os multiplicadores, permitem prever que se consiga atingir um valor de tensão de 2V à saída do multiplicador D, de forma a garantir o correcto funcionamento do sistema de recolha de energia electromagnética do ambiente.

A tabela 5.8 condensa os diversos resultados obtidos nos testes realizados ao circuito implementado aqui denominado como multiplicador D. Estes resultados foram obtidos nas mesmas condições dos anteriores, pelo que são omissas maiores explicações sobre a forma de obtenção dos mesmos. Recorde-se, no entanto, que estes valores dizem respeito a testes efectuados sem carga aplicada ao multiplicador.

V_M [V]	V_{Mreal} [V]	f [MHz]	$\{V_{out}\}_{med}$ [V]	$X = \frac{\{V_{out}\}_{med}}{V_M}$	δ [mV]	Ef (%)
0,5	0,49	0,5	1,76	3,52	40	22,0
	0,504	1	1,9	3,8	44	23,8
	0,508	2	2,46	4,92	42	30,8
	0,528	5	2,88	5,76	44	36,0
	0,563	10	2,78	5,56	48	34,8
	0,453	20	2,76	5,52	44	34,5
0,25	0,25	0,5	0,488	1,952	34	12,2
	0,253	1	0,732	2,928	36	18,3
	0,255	2	0,896	3,584	34	22,4
	0,264	5	1	4	36	25,0
	0,272	10	0,912	3,648	38	22,8
	0,214	20	0,925	3,7	40	23,1
0,125	0,121	0,5	0,162	1,296	30	8,1
	0,123	1	0,231	1,848	26	11,6
	0,126	2	0,262	2,096	24	13,1
	0,128	5	0,27	2,16	24	13,5
	0,141	10	0,256	2,048	28	12,8
	0,113	20	0,284	2,272	30	14,2

Tabela 5.8 Multiplicador D: resultados da implementação

Os resultados obtidos permitem prever que o multiplicador possa funcionar nas condições previstas para o sistema de recolha de energia do ambiente.

Apesar de se obterem valores da eficiência na conversão AC-DC relativamente baixos, o que seria de prever dadas as perdas inerentes à implementação do circuito, conseguem obter-se na saída valores de tensão que permitem colocar em funcionamento o sistema de recolha de energia do ambiente. Considerando uma amplitude de sinal de entrada de 0.5 V, pode verificar-se na tabela 5.8 que se conseguem obter na saída do multiplicador valores de tensão superiores a 2V, que é o valor considerado necessário, pelas razões já descritas neste documento.

Os valores de tensão de ondulação obtidos na saída do multiplicador também estão dentro do esperado, não constituindo qualquer problema ao normal funcionamento do sistema.

5.3.4.4 Multiplicador D – Comparação de resultados

Como forma de melhor avaliar o desempenho do multiplicador D, mais uma vez se efectua uma comparação entre os resultados obtidos nas simulações e nos testes realizados ao multiplicador implementado. A figura 5.32 contém dois gráficos, que fazem a comparação dos valores obtidos em simulação e na implementação do multiplicador, para as amplitudes do sinal de entrada consideradas adequadas.

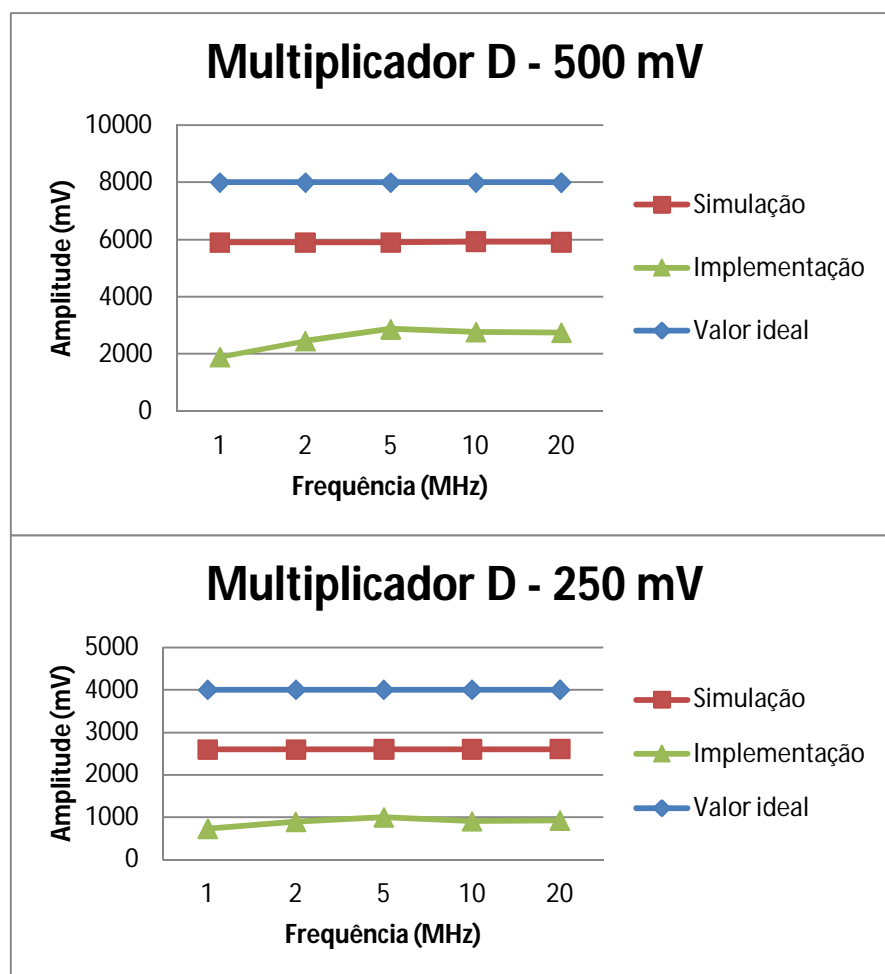


Figura 5.32 Multiplicador D: comparação dos resultados obtidos

Os resultados aqui obtidos são considerados como estando dentro da normalidade. Pode verificar-se que, mais uma vez, os valores de eficiência obtidos em simulação são bastante superiores àqueles obtidos quando se implementa o circuito. Inerentes a estes resultados estão as perdas que ocorrem nos diversos componentes e na placa onde o circuito foi implementado. Pode, no entanto, verificar-se que o multiplicador D tem um comportamento semelhante ao circuito implementado, não perdendo eficiência com o aumento da frequência. Para a amplitude de 0.5 V, considerada como a amplitude mais perto daquela que deverá ser realmente utilizada no sistema de recolha de energia, pode inclusive verificar-se um ligeiro aumento do valor da tensão de saída do multiplicador, com o aumento da frequência.

Os resultados aqui obtidos constituem uma boa indicação de que este multiplicador deverá funcionar da forma pretendida, apesar do baixo valor de eficiência na conversão AC-DC que evidencia. No entanto, não se pode afirmar de forma objectiva que o sistema de recolha de energia funcionará com este multiplicador, uma vez que não foi possível testar as frequências definidas como frequências de trabalho do sistema de recolha de energia. De qualquer forma, os resultados obtidos, tanto em simulações como no circuito implementado, constituem uma indicação positiva em como o funcionamento do multiplicador estará dentro do desejado.

Para terminar a avaliação de desempenho deste multiplicador, a figura 5.33 contém uma comparação dos valores da tensão de ondulação obtidos, nas diversas condições testadas, tanto em simulação como na implementação do circuito.

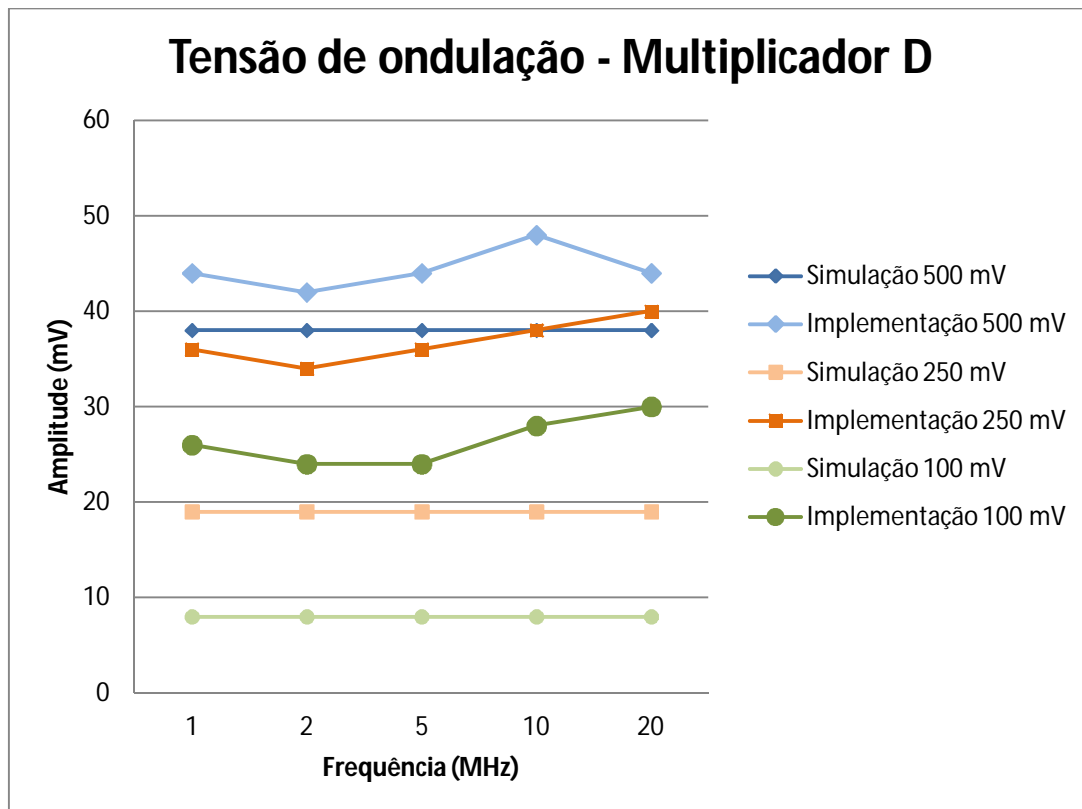


Figura 5.33 Multiplicador D: tensões de ondulação

Como se pode observar nesta figura, os resultados obtidos permitem concluir que o funcionamento do multiplicador, no que se refere à tensão de ondulação do seu sinal de saída, está dentro do esperado. Pode verificar-se que na implementação existe uma tensão de ondulação ligeiramente superior àquela existente na simulação. No entanto estes valores estão dentro duma gama aceitável, pelo que não constituem problema para o correcto funcionamento do multiplicador.

5.4 Comparação dos diversos multiplicadores implementados

Apesar das diversas comparações já apresentadas em cada um dos multiplicadores, considera-se útil efectuar uma comparação entre os resultados obtidos nos diversos multiplicadores. Desta forma, é possível avaliar não só o desempenho individual de cada um dos multiplicadores, mas também verificar as diferenças entre eles, permitindo assim tecer alguns comentários sobre as vantagens e desvantagens de cada um dos multiplicadores.

Recorde-se que o multiplicador A é um multiplicador Cockcroft-Walton, enquanto os restantes são multiplicadores Dickson, pelo que esta comparação serve também para avaliar as diferenças entre estas duas topologias.

Como forma de comparação, considerem-se as expressões que regem o funcionamento de cada um dos multiplicadores implementados, atrás demonstradas e novamente aqui enunciadas.

$$X = 8 - 55 * \frac{g}{f * C} \quad (5.8)$$

$$V_{out} = V_{in} + 2n * (V_{in} - V_D) \quad (5.7)$$

Recorde-se que a expressão 5.8 é representativa do funcionamento do multiplicador Cockcroft-Walton de quatro níveis, onde:

- f: frequência de operação do multiplicador;
- C: valor de capacidade dos condensadores utilizados;
- $g = \frac{I_{out}}{V_M}$, com I_{out} sendo a corrente de saída do multiplicado e V_M a amplitude da tensão de entrada.

Por seu lado, 5.7 representa o funcionamento dos multiplicadores Dickson e

- n: número de níveis do multiplicador;
- V_{in} : amplitude da tensão de entrada;
- V_D : tensão de limiar de funcionamento do díodo.

Com estas expressões é possível analisar e comparar o funcionamento de cada um dos multiplicadores implementados. Juntando os resultados destas expressões aos valores de eficiência atingidos na conversão AC-DC em cada um dos multiplicadores, é possível verificar quais as características dos diversos multiplicadores.

Tendo em conta os valores de amplitude de sinal que se esperam obter à saída da antena que recolhe energia do ambiente, a comparação aqui efectuada terá apenas em conta os resultados obtidos nos diversos testes quando se utiliza na entrada do multiplicador um sinal cuja amplitude é de 0.5 V. Dos conjunto de testes efectuados, este valor é o que mais se

assemelha ao valor que se espera obter na saída da antena, daí a escolha desta comparação recair sobre os resultados respectivos.

Antes de efectuar uma comparação entre os diversos multiplicadores considerem-se novamente as expressões 5.7 e 5.8.

No caso particular dos testes aqui efectuados, os multiplicadores foram testados em vazio, isto é, sem nenhuma carga. Desta forma, pode-se considerar que a corrente à saída do multiplicador é zero.

Assim, a expressão 5.8 que modela o funcionamento do multiplicador A fica

$$X = 8 - 55 * \frac{g}{f * C} = 8$$

Ora definiu-se anteriormente

$$X = \frac{V_{out}}{V_{in}}$$

Portanto, considerando o multiplicador A

$$X = \frac{V_{out A}}{V_{in A}} = 8 \Leftrightarrow V_{out A} = 8 * V_{in A}$$

O comportamento do multiplicador A, tendo em conta que não tem carga acoplada, deveria ser portanto ideal.

Tendo em conta que nesta secção se considera apenas os testes cuja amplitude do sinal de entrada é de 0.5 V, tem-se por fim

$$V_{out A} = 8 * V_{in A} = 8 * 0.5 = 4 V$$

No caso do segundo e terceiro multiplicadores, ambos tinham quatro níveis de multiplicação, pelo que considerando a expressão 5.7 se tem

$$V_{out} = V_{in} + 2n * (V_{in} - V_D) \Leftrightarrow V_{out 2,3} = V_{in} + 8 * (V_{in} - V_D) [V]$$

Ainda tendo em conta o funcionamento dos multiplicadores B e C, foram utilizados os mesmos díodos. Segundo dados do fabricante, os BAT62-03W têm uma tensão de limiar de funcionamento típica de $V_D = 0.35 V$. No entanto, medições efectuadas nas implementações dos multiplicadores permitem definir $V_D = 0.3 V$. Considerando por fim que a amplitude do sinal de entrada é de 0.5 V, tem-se

$$V_{out 2,3} = 0.5 + 8 * (0.5 - 0.3) = 2.1 V$$

Como se pode verificar, devido a razões puramente construtivas, o multiplicador de Dickson apresenta na sua saída um resultado diferente do resultado do multiplicador ideal.

Finalmente, para o multiplicador D, considerando as suas características e o que aqui foi tido para os multiplicadores B e C, pode afirmar-se

$$V_{out\ 4} = 0.5 + 16 * (0.5 - 0.3) = 3.7\ V$$

Considerando as diversas frequências testadas, os valores da tensão de saída dos multiplicadores, quer em simulação, quer na implementação prática e os valores agora obtidos para a tensão de saída dos multiplicadores através da aplicação das expressões 5.7 e 5.8, pode fazer-se uma análise gráfica de todos os resultados obtidos.

Esta análise gráfica está contida na figura 5.34, apresentada em seguida. Esta figura contém quatro gráficos, cada um representativo do comportamento de cada um dos multiplicadores.

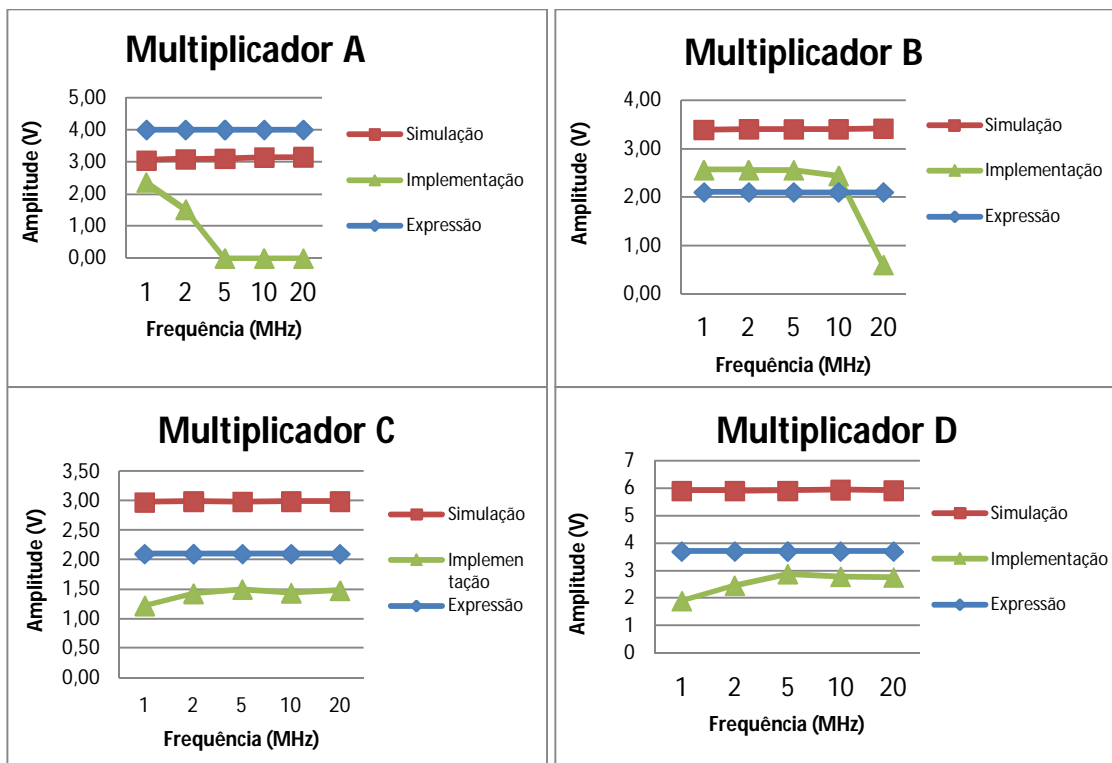


Figura 5.34 Comparação da tensão de saída dos multiplicadores ($V_{in} = 0.5V$)

Como se pode ver, exceptuando o multiplicador A, as expressões utilizadas anteriormente representam um comportamento bastante aproximado do real comportamento dos multiplicadores.

No caso dos multiplicadores B, C e D, os valores da tensão de saída do multiplicador, indicados pela expressão 5.7 está inclusive mais perto do real funcionamento dos

multiplicadores do que as simulações efectuadas em cada caso. Isto comprova que a expressão 5.7 é uma expressão que modela bem o comportamento real dos multiplicadores de tensão de topologia Dickson. Note-se assim que, de acordo com a expressão 5.7, o valor de multiplicação de tensão de um determinado multiplicador não depende apenas do número de níveis desse multiplicador, mas também da tensão de entrada. Quanto maior for a amplitude da tensão à entrada do multiplicador, mais efectivo ele será, ou seja, mais multiplicará esse valor, mesmo tendo o mesmo número de níveis. Desta forma, dados os valores de tensão envolvidos, não se espera que na recolha de energia do ambiente estes multiplicadores possam atingir elevados valores de eficiência na conversão AC-DC.

No caso do multiplicador A, não se podem tirar conclusões semelhantes àsquelas retiradas nos restantes multiplicadores, dado que a expressão 5.8, que modela o comportamento do multiplicador, no caso de ausência de corrente de saída devolve exactamente o valor correspondente ao multiplicador ideal. Recorde-se que num multiplicador ideal, o valor da tensão de entrada é multiplicado por $2n$, sendo n o número de níveis do multiplicador.

Para finalizar a comparação entre os diversos multiplicadores e os resultados obtidos no conjunto de testes efectuados, veja-se a figura 5.35, que contém uma evolução da eficiência dos quatro multiplicadores com a frequência para uma amplitude de entrada de 0.5 V.

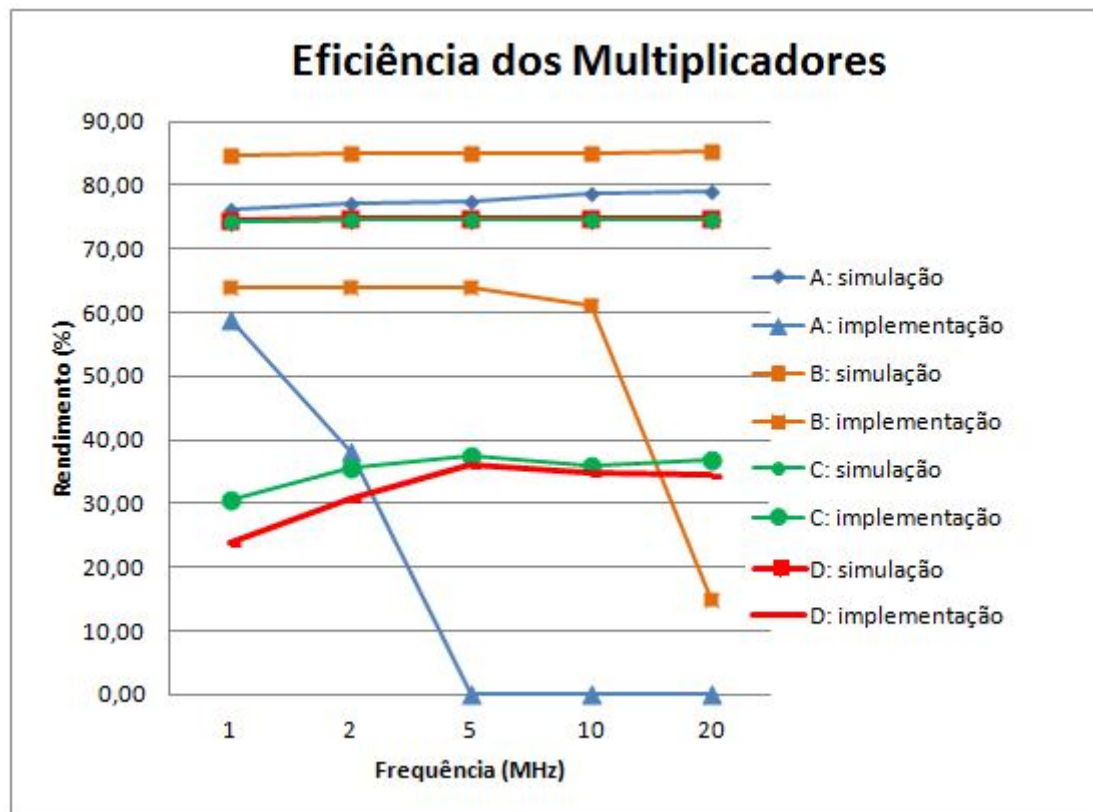


Figura 5.35 Comparação das eficiências dos multiplicadores

Como se pode observar, as eficiências obtidas em simulação são sempre bastante superiores às obtidas na implementação do sistema. Isto deve-se às razões já apresentadas.

Os multiplicadores A e B são capazes de funcionar apenas em baixas frequências. Isto é natural dadas as características dos componentes envolvidos. Por sua vez, os multiplicadores C e D têm valores de eficiência semelhantes, mas inicialmente bastante inferiores àqueles apresentados pelos multiplicadores A e B. No entanto, o aumento das frequências, pelo menos aquelas em que foi possível testar os multiplicadores, parece não afectar este valor de eficiência.

Por fim, é necessário notar que com os diversos multiplicadores, os valores de eficiência dados pelo simulador são sempre semelhantes, até para frequências bastante maiores que as aqui representadas. Os dados presentes nas tabelas 5.1, 5.3 e 5.5 comprovam este facto. Isto poderá indicar que este simulador não é o ideal para testar circuitos de radiofrequência, uma vez que parece não ter em conta a influência do aumento de frequência na eficiência dos circuitos.

Com esta análise conclui-se a comparação entre os diversos multiplicadores, sendo que o multiplicador D é o único que cumpre as especificações necessárias para o correcto funcionamento do sistema de recolha de energia.

5.5 Melhorias a considerar nos multiplicadores

Como se viu nas secções anteriores, dos diversos multiplicadores simulados e implementados, apenas o multiplicador D, um multiplicador Dickson de 8 níveis, cumpre as especificações necessárias ao correcto funcionamento do sistema de recolha de energia. A principal especificação deve-se ao facto de ser necessário ter na saída do multiplicador um valor de tensão que ultrapasse os 2 V. Porém, apesar de cumprir com a especificação fundamental, o multiplicador D tem uma eficiência relativamente baixa, tendo em conta a conversão do sinal alternado no sinal contínuo. O multiplicador cujas eficiências são mais elevadas, é o multiplicador A. Recorde-se que o multiplicador A, um multiplicador Cockcroft-Walton, de quatro níveis, não funcionou nas frequências requeridas devido aos componentes utilizados na sua implementação.

No entanto, dado ter sido o multiplicador com melhores valores de eficiência, nesta secção é apresentada uma alteração proposta ao multiplicador A, de forma a melhorar o seu comportamento, aumentando também assim o rendimento do sistema de recolha de energia. Apesar de não serem implementadas estas alterações, serão feitas diversas simulações que, em comparação com as simulações já feitas ao multiplicador A poderão dar uma ideia das melhorias que estas alterações poderiam trazer à eficiência do multiplicador e, consequentemente, ao rendimento do sistema de recolha de energia do ambiente. Estas alterações consideram desde logo que o multiplicador é implementado com novos componentes, adequados ao funcionamento em altas frequências.

Todos os multiplicadores implementados têm em comum o facto de se ter seguido a abordagem clássica, recorrendo a condensadores iguais para implementar os diversos níveis dos multiplicadores.

Para o caso do multiplicador A, recorde-se que se tinha

$$C = C_{2i-1} = C_{2i}$$

O que resultava na expressão 5.4, que modela o comportamento do multiplicador. Esta mesma expressão está aqui novamente enunciada.

$$X = 2 * n - \frac{g}{f * C} * \left(\frac{8n^3 + 9n^2 + n}{12} \right)$$

No entanto, em [22], uma nova abordagem foi seguida e feitos diversos testes foi possível chegar à conclusão que a utilização de condensadores iguais em todos os níveis do multiplicador não gera um aproveitamento completo das capacidades de multiplicação. Não se está então numa situação ideal. Para provar isso, consideraram-se diversos outros casos, e num

deles foi possível verificar que o rendimento do multiplicador aumentava significativamente, através da modificação dos valores dos condensadores dos seus níveis constituintes. É de notar, no entanto, que para aumentar o rendimento poderia ser necessário aumentar o número de níveis do multiplicador.

O estudo realizado em [22] diz respeito a multiplicadores Cockcroft-Walton apenas. Dado que os multiplicadores de Dickson se comportam de forma diferente, este estudo não lhes pode ser aplicado. Assim, nesta secção, será considerado um multiplicador Cockcroft-Walton com componentes adequados para o funcionamento em radiofrequência, ou seja, com díodos BAT62-03W e será verificado se este estudo apresenta efectivamente uma melhoria de resultados. Caso isto se verifique, este multiplicador deveria ser o escolhido para a implementação do sistema de recolha de energia. Recorde-se que o multiplicador D, apesar de ser melhor que os restantes, tinha uma eficiência relativamente baixa, o que significa que tem perdas importantes. Na recolha de energia do ambiente o nível de perdas é bastante importante, dado tratarem-se de valores de potência extremamente baixos. Portanto, se os resultados a que se chegar nesta secção o justificarem, deveria passar a ser utilizado um multiplicador que não o D, na implementação do sistema de recolha de energia.

Considere-se então dois casos distintos, a ter em conta na implementação de um multiplicador Cockcroft-Walton.

- Caso 1: $C = C_{2i-1} = C_{2i}$
- Caso 2: $C_{2i} = C_{2i-1} = (n + 1 - i) * C$

Em ambos os casos, C representa o último condensador do multiplicador também designado condensador base.

Já se viu que o caso 1 leva ao aparecimento da expressão 5.4, que indica o ganho do multiplicador, em determinadas condições. Aplicando o mesmo raciocínio ao caso 2, ou seja, através das expressões 5.1, 5.2 e 5.3, pode-se obter uma expressão do mesmo tipo. Tem-se portanto

- Caso 1:

$$X = 2 * n - \frac{g}{f * C} * \left(\frac{8n^3 + 9n^2 + n}{12} \right) \quad (5.4)$$

- Caso 2:

$$X = 2 * n - \frac{g}{f * C} * \left(\frac{2n^2 + n}{2} \right) \quad (5.10)$$

Em ambos os casos

$$g = \frac{I_{out}}{V_M}, n = \text{número de níveis.}$$

Considerando que se deseja que o multiplicador tenha um ganho $X = 8$, idealmente o multiplicador necessitaria quatro níveis, em ambos os casos. No entanto, analisando novamente as expressões 5.4 e 5.10 e minimizando o número de níveis, vão obter-se expressões diferentes nos dois casos. Assim, considerando N_{opt} como o número ótimo de níveis para se obter um determinado ganho, obtém-se

- Caso 1:

$$N_{opt} = \frac{3}{4} * X + \frac{3}{16} = \frac{3}{4} * 8 + \frac{3}{16} \cong 6$$

- Caso 2:

$$N_{opt} = X + \frac{1}{4} = 8 + \frac{1}{4} \cong 8$$

Combinando as expressões 5.4 e 5.10 com as expressões que dão o número ótimo de níveis para cada um dos casos, podem por fim obter-se as expressões que indicam qual o valor de condensador base a utilizar, de forma a atingir o ganho desejado.

- Caso 1:

$$C = \frac{g}{f} * \frac{8N_{opt}^3 + 9N_{opt}^2 + N_{opt}}{12 * (2N_{opt} - X)} \quad (5.11)$$

- Caso 2:

$$C = \frac{g}{f} * \frac{2N_{opt}^2 + N_{opt}}{2 * (2N_{opt} - X)} \quad (5.12)$$

Considerando $I_{out} = 1\text{mA}$, um valor que se espera aceitável, mesmo para o sistema de recolha de energia, e $V_M = 0.5\text{ V}$, tem-se

$$g = \frac{I_{out}}{V_M} = 0.002$$

Considerando uma frequência de 500 MHz, dado que esta é a frequência de operação do sistema de recolha de energia, tendo em conta que se espera obter um ganho de 8, pode fazer-se

- Caso 1:

$$C = \frac{g}{f} * \frac{8N_{opt}^3 + 9N_{opt}^2 + N_{opt}}{12 * (2N_{opt} - X)} = \frac{0.002}{500 * 10^6} * \frac{8 * 6^3 + 9 * 6^2 + 6}{12 * (2 * 6 - 8)} = 172\text{ pF}$$

- Caso 2:

$$C = \frac{g}{f} * \frac{2N_{opt}^2 + N_{opt}}{2 * (2N_{opt} - X)} = \frac{0.002}{1 * 10^6} * \frac{2 * 8^2 + 8}{2 * (2 * 8 - 8)} = 34 \text{ pF}$$

Tendo em conta os valores de condensador base aqui obtidos e as expressões que para ambos os casos dão os valores dos restantes condensadores, foram simulados então os circuitos presentes nas figuras 5.36 e 5.37. Estes circuitos foram simulados recorrendo mais uma vez ao software OrCAD PSPICE.

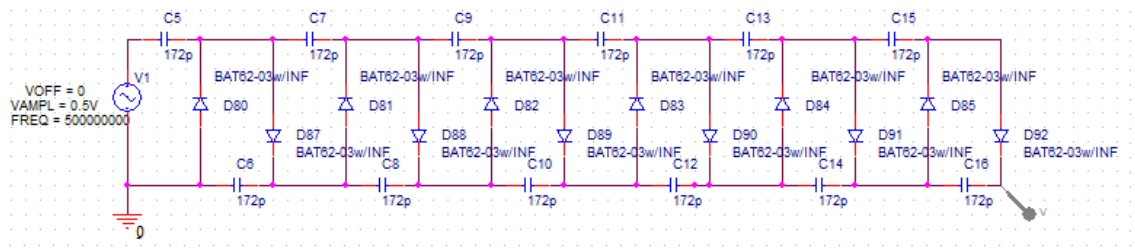


Figura 5.36 Caso 1: circuito multiplicador

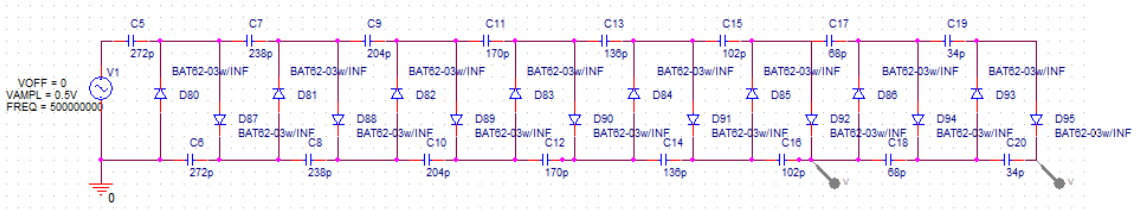


Figura 5.37 Caso 2: circuito multiplicador

Os circuitos das figuras 5.36 e 5.37 foram simulados à frequência de 500 MHz e os resultados obtidos estão contidos na tabela 5.9.

	V_M [V]	f [MHz]	$\{V_{out}\}_{med}$ [V]	$X = \frac{\{V_{out}\}_{med}}{V_M}$
Caso 1	0,5	500	4,47	8,94
Caso 2a	0,5	500	4,88	9,76
Caso 2b	0,5	500	6,32	12,64

Tabela 5.9 Comparação dos resultados obtidos

Como se pode verificar, no caso 2 (linha referente ao caso 2a) obtém-se na saída um valor de tensão superior, o que se reproduz num maior ganho de tensão. Isto prova que utilizando um multiplicador de tensão implementado seguindo as condições impostas no caso 2 e possível obter melhores resultados. Fica assim validado o estudo aqui proposto, e que está de acordo com o estudo também realizado em [22]. Note-se que dado tratar-se de uma simulação, os valores de ganho obtidos são inclusivamente superiores aos valores teoricamente propostos (ganho de 8). No entanto, se o circuito fosse implementado seria possível verificar que este valor de ganho iria diminuir, tal como aconteceu nos multiplicadores A a D. Tenha-se ainda em atenção que os

dados obtidos referentes ao caso 2a correspondem aos valores de tensão na saída do sexto nível, e não na saída do oitavo e último nível do multiplicador. Isto foi feito de forma a facilitar a análise dos dados. Os valores de ganho obtidos no último nível correspondem aos indicados na tabela como caso 2b. Como se pode verificar, o valor de ganho é superior àquele atingido pelo multiplicador D nas mesmas condições, que é de 11,49. Isto indica que o multiplicador aqui proposto é aparentemente melhor que o multiplicador D.

Desta forma, dada a maior eficiência atingida com os multiplicadores Cockcroft-Walton, o multiplicador D poderia ser substituído por este novo multiplicador, cujo circuito está na figura 5.37, a fim de melhorar o rendimento do sistema de recolha de energia do ambiente.

6 Reguladores de tensão

Como se verificou na secção anterior, na saída do multiplicador existirá um determinado nível de tensão, que além de uma componente continua tem uma componente alternada referente à tensão de ondulação causada pelo normal funcionamento do multiplicador. Além disto, a tensão à saída do multiplicador depende em cada instante do sinal RF que chega ao sistema e que a antena recolhe. Como se sabe, devido a diversos fenómenos, por exemplo as condições atmosféricas, mesmo que o sistema de recolha de energia se encontre estático, o valor de energia RF na entrada do sistema pode ser diferente. Isto leva a que a tensão na saída do multiplicador possa ser diferente em cada instante.

Para o sistema alimentar algum dispositivo, é necessário que a sua saída seja regulada, de forma a garantir que não existirão sobretensões na alimentação do dispositivo. Além disso, dependendo do tipo de dispositivo utilizado, a tensão de ondulação que naturalmente surge na saída do multiplicador pode ser um problema.

Devido aos aspectos referidos anteriormente, torna-se fundamental a utilização de um regulador de tensão no sistema de recolha de energia. O regulador de tensão será assim o último bloco constituinte do sistema, como se pode verificar na figura 3.1 deste documento. O regulador deve ser assim capaz de garantir a estabilidade da saída do sistema, isto é, deve conseguir garantir um valor de tensão estável, para se poder alimentar directamente algum tipo de dispositivo e deve ainda eliminar ou minimizar a tensão de ondulação, que poderá ser prejudicial ao dispositivo alimentado pelo sistema.

Como os reguladores de tensão são componentes conhecidos e desenvolvidos há muitos anos e dado o estado actual do desenvolvimento destes componentes em que já se desenvolvem reguladores de tensão especificamente para a recolha de energia do ambiente, o regulador utilizado neste projecto será uma versão comercial e não um regulador implementado de raiz. Desta forma, conseguem reduzir-se bastante as perdas que inevitavelmente irão ocorrer neste bloco, conseguindo-se ainda assegurar o correcto funcionamento do regulador. Assim, olhar-se-á para o regulador como um bloco negro, com determinadas entradas e saídas, sem ter em conta os constituintes internos do regulador. Refira-se por uma questão de justificação apenas que um regulador pode ser constituído por mais de uma dezena de transístores e, portanto, se implementado recorrendo a elementos discretos iria introduzir muitas perdas no sistema.

Sendo que o regulador de tensão não será implementado de raiz, também não se justifica que se façam simulações a confirmar esse funcionamento do regulador. Assim, nesta secção serão apresentadas as diversas topologias existentes de reguladores, e quais as que se consideram mais adequadas para a utilização como bloco constituinte do sistema de recolha de

energia. Por fim, serão escolhidos e apresentados alguns exemplos de reguladores existentes no mercado que garantem o correcto funcionamento do sistema, salvaguardando as diversas diferenças de operação que podem existir ao nível do valor de tensão na saída do multiplicador.

6.1 Reguladores de tensão - topologias

Os reguladores de tensão estão divididos em dois grandes grupos no que se refere à forma como regulam o valor de tensão na sua saída, ou seja, à forma como são implementados:

- Reguladores de tensão lineares;
- Reguladores de tensão com comutação;

Não faz sentido apresentar possíveis reguladores para utilizar no sistema de recolha de energia, sem primeiro explicar brevemente o modo de funcionamento de cada uma destas topologias, apresentando as diferenças entre ambas e o porquê de neste caso específico se escolher uma determinada topologia. Os reguladores de tensão lineares são os reguladores de tensão convencionais, mais utilizados e cujo funcionamento é mais simples de perceber [23]. No entanto, devido a diversas vantagens, as aplicações em que se usam reguladores de tensão com comutação têm aumentado muito nos últimos anos e espera-se que estes reguladores comecem a ser o principal tipo existente no mercado. Veja-se então o princípio de funcionamento de cada uma das topologias já descritas.

Os reguladores de tensão lineares, que ainda se podem separar em subcategorias, baseiam-se todos no mesmo princípio. Através da utilização de uma tensão de referência, V_{REF} , e de um amplificador, o regulador mantém a tensão de saída V_{out} igual a V_{REF} , ou a um múltiplo desta. Caso se verifique um erro na tensão de saída, comparativamente ao valor esperado, esse erro é amplificado através da utilização do amplificador e o regulador irá tentar corrigir o erro existente. Isto implica obviamente que existirá um processo de retroacção no amplificador. O processo aqui descrito está ilustrado na imagem 6.1.

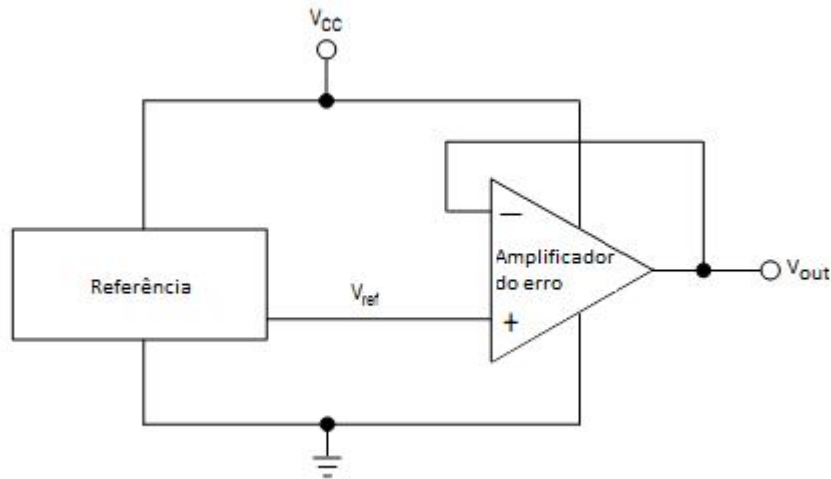


Figura 6.1 Princípio de funcionamento de um regulador linear

Tal como indicado na figura 6.1, o regulador corrigirá qualquer flutuação existente na tensão V_{CC} . É bastante claro que o principal problema associado a este tipo de regulador será assegurar que a referência é estável, ou seja, que V_{REF} é idealmente sempre igual. Tendo em conta que as condições de funcionamento do regulador, por exemplo a temperatura, podem modificar-se, é bastante complicado manter esta estabilidade. Além disso, é preciso assegurar que variações na tensão de entrada não afectam o valor da tensão de saída, pois de outra forma o regulador não cumpre o seu principal objectivo.

Uma forma muito utilizada de criar uma tensão de referência relativamente estável é através da utilização de um diodo Zener em série com uma resistência. A figura 6.2 mostra um exemplo deste circuito de referência.

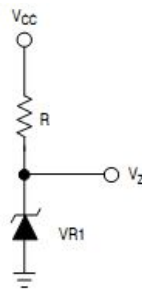


Figura 6.2 Tensão de referência obtida com diodo zener.

A tensão de referência utilizada será assim a própria tensão de Zener do diodo. Recorde-se que a tensão de Zener de um diodo Zener pode ser obtida recorrendo a

$$V_Z = V_{BZ} + I_Z * Z_Z = V_{BZ} \left(\frac{V_{CC} - V_{BZ}}{R + Z_Z} \right) Z_Z \quad (6.1)$$

Onde V_{BZ} representa a tensão de ruptura do diodo Zener e Z_Z representa a impedância do diodo Zener, a uma determinada corrente I_Z .

Note-se que a expressão 6.1 só é realmente válida mantendo a temperatura constante, pois uma alteração da temperatura levará a uma alteração da impedância do diodo. Note-se ainda que a tensão de referência aqui obtida $V_{REF} = V_Z$, depende da corrente que percorre o diodo Zener e, portanto, existindo alterações na corrente, leva a que existam alterações na tensão de referência. Ora alterando o valor de V_{CC} , fica claro que o valor de I_Z irá alterar, levando assim a uma alteração não desejada de V_{REF} .

Uma forma usual de contrariar estes dois efeitos é utilizar o circuito da figura 6.3.

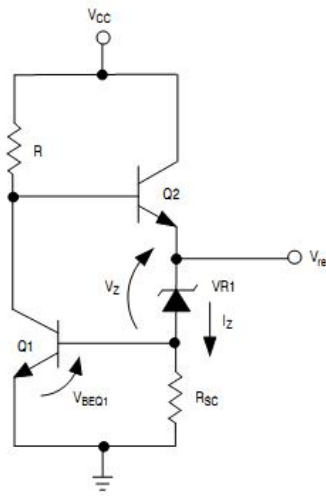


Figura 6.3 Obtenção de V_{REF} , através do diodo Zener com corrente constante

Através da utilização do transistor Q1, a corrente que percorre o diodo zener é dada por

$$I_Z = \frac{V_{BEQ1}}{R_{SC}} \quad (6.2)$$

Onde V_{BEQ1} é a tensão base emissor do transistor Q1.

Desta forma, a tensão de referência é então

$$V_{REF} = V_Z + V_{BEQ1} = V_{BZ} + I_Z * Z_Z + V_{BEQ1}$$

Onde I_Z é constante e dado pela equação 6.2.

Desta forma, uma alteração na tensão de entrada do regulador não alterará a corrente que passa no diodo e, portanto, não vai alterar a tensão de referência. Tenha-se em conta ainda outro aspecto. Tipicamente, num diodo Zener, a variação da tensão do diodo com a temperatura é $+2.2 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ [23]. Ora num transistor de junção bipolar PNP, a variação da tensão base emissor

com a temperatura é tipicamente $-2.2 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ [23]. Isto resulta na anulação dos efeitos da temperatura na tensão de referência.

Anulados os dois efeitos descritos, consegue assim obter-se uma tensão de referência muito estável, o que vai assegurar o correcto funcionamento do regulador.

Como se disse inicialmente, além do díodo Zener, que dá origem a uma tensão de referência, o regulador é constituído por um amplificador, utilizado para amplificar o erro entre o valor da tensão de saída desejado e aquele realmente obtido. Relativamente a este amplificador note-se apenas que este deverá ter uma elevada relação de rejeição do modo comum (CMRR), de forma a não amplificar o sinal em si, mas apenas o erro.

Note-se no entanto que apesar de ser bastante fiável, este tipo de reguladores têm um ponto negativo, que é importante salientar. Para se verificar melhor esta desvantagem, considere-se um regulador básico, com tensão de referência dada por um díodo Zener, com o circuito da figura 6.4.

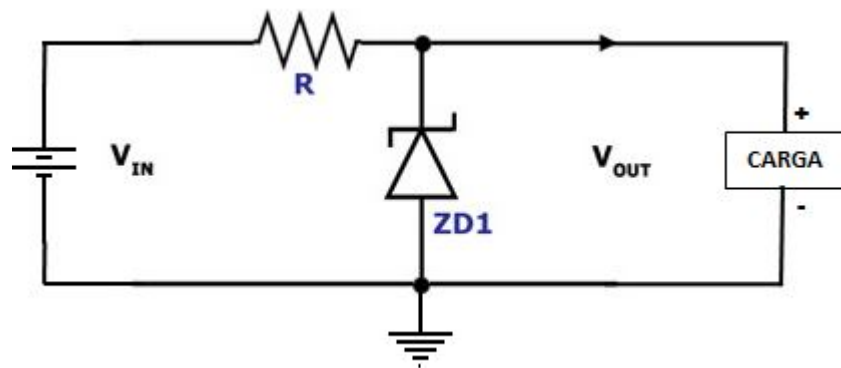


Figura 6.4 Regulador com díodo Zener

No caso extremo do regulador estar a funcionar sem carga aplicada, como se pode observar pela figura 6.4, o díodo Zener terá que dissipar toda a potência existente no regulador. Ora, isto limita fortemente as aplicações deste tipo de reguladores, pois não podem ser utilizados em circuitos em que a potência envolvida seja elevada, uma vez que os díodos Zener são dispositivos de baixa potência que iriam entrar em disrupção, caso se aplique uma potência maior que a suportada pelo díodo.

No entanto, no caso particular do projecto de um sistema de recolha de energia do ambiente, o comportamento descrito acima não é um problema, uma vez que os níveis de potência envolvidos são bastante baixos. No entanto, este comportamento do regulador desaconselha a sua utilização na recolha de energia do ambiente. Ora, o principal objectivo da recolha de energia do ambiente é capturar o máximo possível de energia e acumular essa

energia ou utilizá-la para alimentar um determinado dispositivo (ou ambas). Utilizar um regulador de tensão dissipativo, em que o excesso de tensão que exista na sua entrada é dissipado pelo diodo Zener, vai contra o principal princípio da recolha de energia do ambiente.

Desta forma, os reguladores de tensão lineares, que são todos dissipativos, não são utilizados em sistemas de recolha de energia do ambiente, sendo necessário recorrer a outro tipo de reguladores, os reguladores de tensão com comutação, de seguida descritos.

A principal vantagem dos reguladores de tensão com comutação reside no facto de se conseguirem atingir elevados rendimentos, face aos rendimentos que se conseguem atingir nos reguladores lineares. Além disto, os reguladores com comutação são geralmente bastante pequenos e mais leves que os lineares. Com o avanço da electrónica de reduzida tensão, onde os circuitos são cada vez mais miniaturizados, estes reguladores têm grande aplicação. No entanto, apesar destas vantagens, é necessário referir uma grande desvantagem relativamente às soluções lineares. Os reguladores com comutação introduzem uma grande quantidade de ruído eléctrico na rede, facto que está a gerar cada vez mais preocupações. No entanto, este facto não será aqui abordado, uma vez que o objectivo deste trabalho é criar um sistema independente de alimentação eléctrica de dispositivos móveis.

Os reguladores com comutação são circuitos com uma complexidade bastante superior aos reguladores de tensão lineares, uma vez que o processo de regulação engloba:

- Uma transformação do sinal de entrada num sinal alternado, através da utilização de um inversor de alta frequência (20 kHz até 200 kHz);
- É também neste inversor que o valor de tensão do sinal é ajustado, para se atingir o valor de tensão que se pretende na saída do regulador;

Tanto a frequência do sinal gerado internamente como o valor da tensão de saída são definidos recorrendo a um circuito de controlo que define a frequência de comutação dos diversos interruptores presentes no circuito. É este processo de funcionamento dos interruptores que gera ruído eléctrico, prejudicial para a estabilidade da rede. Normalmente este circuito de controlo contém uma técnica bastante conhecida denominada modulação por largura de impulsos (PWM). Basicamente, se o circuito de controlo fornecer um sinal com pulsos mais largos, a tensão da saída do regulador aumenta e, pelo contrário, se for fornecido um comboio de pulsos mais estreitos, a tensão do sinal de saída irá diminuir. Desta forma é possível definir exactamente qual o valor de tensão na saída do regulador. Se existir um aumento ou diminuição da carga, o que leva respectivamente a uma diminuição ou aumento da tensão de saída do regulador, o circuito de controlo consegue assim inverter a tendência da tensão descer ou subir, garantindo sempre o mesmo nível de tensão na saída do regulador.

Apesar de actualmente existir uma grande gama de topologias diferentes de reguladores de tensão com comutação, todas estas topologias resultam de alterações efectuadas a três topologias básicas. São estas três topologias que serão brevemente apresentadas neste documento. A figura 6.5 contém as três topologias básicas, sendo que uma delas já é gerada a partir das outras duas.

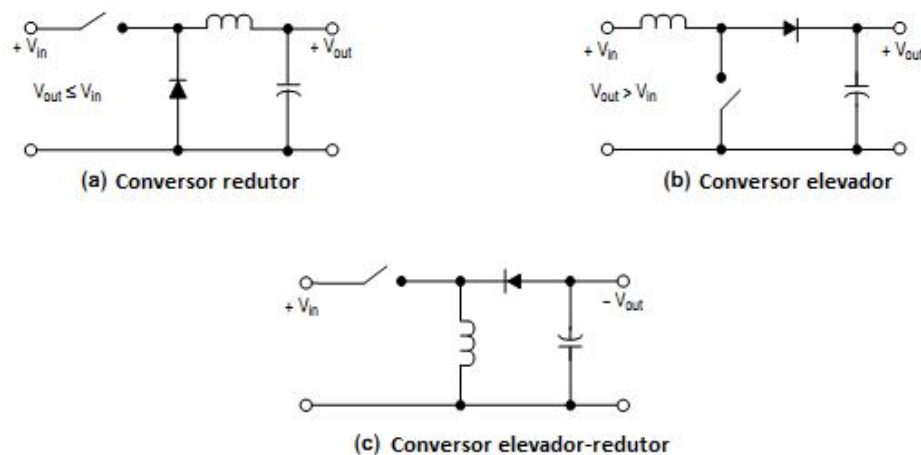


Figura 6.5 Reguladores com comutação: topologias básicas

Nesta figura apenas estão desenhados os circuitos de regulação. Note-se que além deste circuito existe o circuito de controlo, responsável pela comutação do interruptor presente nos diversos circuitos. Como se pode verificar, existe em todos os circuitos uma bobina, que limita o valor da corrente na saída, e um díodo. Este díodo é denominado díodo de roda livre e é utilizado de forma a garantir um caminho para a corrente, quando o interruptor está aberto. Recorde-se que num circuito indutivo não se pode cortar instantaneamente a corrente eléctrica, correndo-se o perigo de danificar o próprio circuito. Segue-se uma breve explicação da finalidade de cada um dos circuitos.

O conversor redutor (em inglês: buck converter) é um regulador que apresenta na sua saída uma tensão inferior à tensão de entrada. No limite, este valor de tensão pode ser igual. Vem daqui o seu nome de redutor, pois reduz o valor da tensão. O conversor elevador (que deriva do inglês boost converter) é, tal como o seu nome indica, um conversor de tensão que garante na sua saída um valor de tensão inferior àquele presente na sua entrada. O conversor elevador-redutor é, tal como se verifica pelo seu nome e na figura 6.5, um regulador que contém as capacidades dos dois anteriores. Desta forma, tendo um determinado valor de tensão na entrada, este regulador pode apresentar na sua saída um valor de tensão inferior, igual ou superior. Note-se, no entanto, que na saída deste tipo de conversor, a tensão virá com o sinal contrário.

6.2 Regulador a utilizar no sistema de recolha de energia

Como já foi referido na secção anterior, é inviável a utilização de um regulador de tensão linear no sistema de recolha de energia. Estes reguladores são dissipativos devido ao seu princípio de funcionamento e, num sistema que se quer optimizado, onde se quer obter o máximo possível de energia do ambiente, não se pode dissipar assim energia de uma forma “gratuita”. Dado este facto, o regulador a utilizar terá que ser um regulador com comutação. Este reguladores têm a desvantagem de gerarem bastante ruído eléctrico, devido ao contínuo processo de comutar um sinal interno, mas no sistema de recolha de energia isto não é importante. O principal factor negativo na geração de ruído eléctrico é a instabilidade que esse mesmo ruído causa na rede. Como o sistema de recolha de energia é um sistema de alimentação independente de circuitos, que não se prevê que esteja ligado à rede eléctrica, este ruído não é importante, desde que se consiga garantir o funcionamento do dispositivo alimentado pelo sistema de recolha de energia.

Dada a grande variedade, baixo preço e elevado rendimento dos reguladores de tensão com comutação existentes no mercado, optou-se pela não implementação de um regulador de raiz, mas sim pela compra de um regulador já implementado. Dada a construção integrada deste regulador, com um circuito miniaturizado, garante-se assim um correcto funcionamento do mesmo, sem adicionar maiores perdas ao sistema de recolha de energia. Desta forma, foram escolhidos dois exemplos de reguladores existentes no mercado, cujas características são apropriadas para o sistema de recolha de energia. Na prática não tem que ser utilizado nenhum destes reguladores, mas deve ser utilizado um cujas características sejam semelhantes.

O primeiro regulador escolhido para a implementação do último bloco funcional do sistema de recolha de energia é o conversor redutor LTC3388-1, da Linear Technology. Trata-se de um conversor que apresenta na saída, entre outros valores, 1.2 V de tensão contínua, tendo na sua entrada um sinal contínuo cuja tensão esteja entre 2.7 V e 20 V. Espera conseguir obter-se o valor de tensão necessário ao funcionamento do regulador (2.7 V) na saída do multiplicador, dado que os testes realizados aos multiplicadores apontam nesse sentido, assegurando-se assim portanto, o correcto funcionamento do regulador.

Segundo dados do fabricante, considerando uma corrente de saída de 1 mA, valor objectivo para o sistema de recolha de energia, o rendimento do regulador anda perto dos 90%. Isto garante um valor mínimo para as perdas existentes no regulador. Tal valor de rendimento seria impossível obter se tivesse sido implementado um regulador de raiz recorrendo a elementos discretos, daí a escolha de um regulador comercial. O LTC3388-1 é um regulador criado para a utilização em recolha de energia do ambiente, portanto as perdas existentes são mínimas, mesmo quando comparado com outras soluções existentes no mercado, daí se ter

optado por esta solução. Este regulador tem ainda a vantagem de se poderem definir outros valores de tensão de saída do sistema, caso as condições de funcionamento sejam suficientemente favoráveis. Isto é, se o sistema for utilizado numa localização em que se consiga recolher mais energia do ambiente que aquela aqui considerada, o valor de tensão da sua saída pode ser aumentado, bastando para isso regular o LTC3388-1.

Apesar de à primeira vista o regulador atrás apresentado ser suficiente para assegurar o correcto funcionamento do sistema, a utilização desse regulador está assente no facto de se conseguir atingir o valor de 2.7 V na saída do multiplicador de tensão. Em certas condições este valor pode não ser atingido e, portanto, se através da utilização de um novo regulador se conseguir assegurar o funcionamento do sistema, está-se numa situação que gera maior conforto, pois o sistema funcionará em num conjunto mais alargado de condições. Desta forma, para garantir o funcionamento do sistema em situações em que a energia captada fica abaixo do esperado, pode ser utilizado um conversor elevador. Claro que este conversor, sendo elevador, irá consumir mais corrente que o anterior, mas considere-se que o sistema consegue fornecer a corrente necessária. Depois de uma pesquisa, optou-se pelo regulador elevador LTC3525L-3, também da Linear Technology. Este regulador também está desenhado especificamente para funcionar em sistemas de recolha de energia do ambiente, pelo que apresenta perdas mínimas, que favorecem o correcto funcionamento do sistema. Trata-se de um regulador que garante na sua saída um valor e tensão de 3 V, desde que tenha na entrada um valor de tensão superior a 0.7 V. Assim, pode verificar-se que o sistema poderá funcionar mesmo em condições mais desfavoráveis, onde não se consigam atingir os 2.7 V na saída do multiplicador, necessários para o correcto funcionamento do regulador anterior.

Com uma corrente de saída de 1mA, este regulador assegura um rendimento superior a 80%, segundo dados do fabricante, rendimento este considerado bastante bom e impossível de atingir caso se optasse mais uma vez pela implementação com elementos discretos.

Qualquer um dos dois reguladores aqui apresentados assegura o correcto funcionamento do sistema, sendo que podem ser facilmente incorporados no mesmo. A incorporação dos reguladores no sistema de recolha de energia pode ser feita recorrendo apenas a três elementos discretos, além do próprio regulador, como indicado pelo fabricante. Dada essa informação ser pública e conhecida, omite-se deste documento. O funcionamento dos dois reguladores de tensão com comutação apresenta rendimentos bastante elevados e o facto de serem especificamente desenhados para a recolha de energia do ambiente assegura a sua fiabilidade do sistema em causa. Desta forma, dados os rendimentos atingidos, com o baixo preço destes reguladores, fica justificada a opção por este tipo de regulador, em vez da implementação de um regulador recorrendo a elementos discretos, cujo rendimento seria obviamente inferior.

(Esta página foi propositadamente deixada em branco)

7 Implementação do sistema

Nas secções anteriores deste documento foi explicada a constituição do sistema de recolha de energia do ambiente, através da explicação da função e implementação de cada um dos blocos constituintes deste sistema, esquematizado na figura 3.1. Apesar de ter sido testado e validado cada componente em separado é fundamental testar o sistema completo, de forma a validar conclusões que possam ser retiradas do real funcionamento do mesmo. Isto torna-se mais importante porque existem componentes do sistema, nomeadamente o multiplicador, cujo comportamento poderá modificar-se razoavelmente quando testado isoladamente e quando testado como bloco constituinte de um sistema maior. Torna-se assim fundamental executar novos testes ao multiplicador, considerando que lhe é aplicada carga. Os resultados efectuados ao sistema completo permitirão ainda concluir sobre qual a potência eléctrica que se consegue efectivamente recuperar do ambiente.

7.1 Testes efectuados ao multiplicador

Inicia-se então esta secção do documento com uma nova série de testes efectuados ao multiplicador escolhido para constituir o sistema de recolha de energia. Através dos testes realizados na secção 5 deste documento, escolheu-se o multiplicador D, um multiplicador Dickson de 8 níveis, para constituir o sistema, dadas as suas vantagens face aos restantes. Assim, inicia-se esta secção com uma nova série de simulações a este multiplicador, colocando agora uma carga no mesmo e avaliando o seu desempenho. O resultado destas simulações permitirá chegar a uma conclusão sobre o real funcionamento do multiplicador e sobre se este é ou não indicado para a implementação do sistema de recolha de energia electromagnética do ambiente. Posteriormente serão ainda efectuados alguns testes ao circuito que implementa este multiplicador.

Considere-se portanto o circuito da figura 7.1, que corresponde ao circuito eléctrico do multiplicador D, com uma carga aplicada.

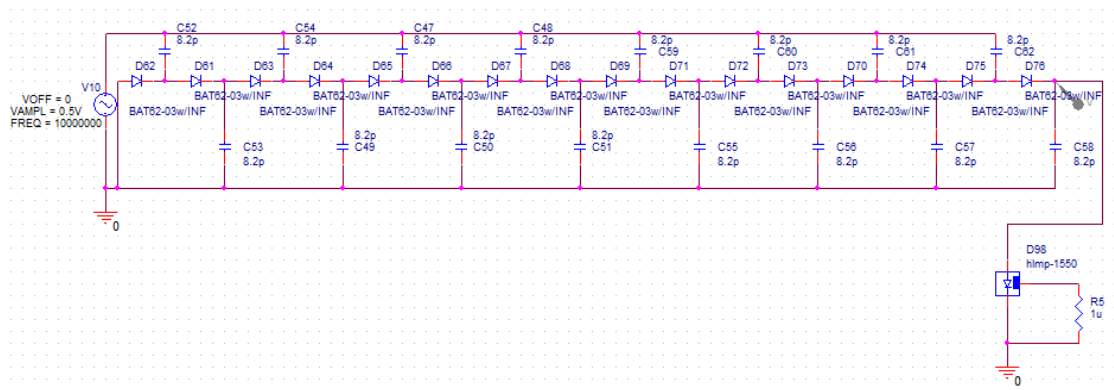


Figura 7.1 Multiplicador D: circuito eléctrico com carga aplicada

Como primeira forma de testar o sistema de recolha considere-se que se liga directamente ao multiplicador um LED, como se verifica na figura 7.1, para verificar se a potência à saída do multiplicador é suficiente para alimentar este mesmo LED. Note-se que não se utiliza o regulador de tensão. Assim, espera-se desde já que se obtenham ondulações no sinal de saída, mas espera-se que mesmo com estas ondulações o sistema seja capaz de fornecer energia suficiente ao LED, para este acender. O LED utilizado será um HLMP-D150 ou um HLMP-Q156, cujas características de funcionamento são:

- HLMP-D150: 1mA, 1.6V o que corresponde a uma potência mínima dissipada de 1.6mW.
- HLMP-Q156: 0.5 mA, 1.6V, o que corresponde a uma potência mínima de 0.8 mW.

Desta forma, colocando o multiplicador a alimentar directamente um destes LED pode concluir-se que o sistema consegue recuperar do ambiente a potência correspondente a cada um dos LED. Como primeira medida das capacidades do sistema, este método é suficiente. Caso se verifique o correcto e espectável funcionamento do sistema, será então testado o modelo completo, com o regulador. No circuito da figura 7.1, o LED utilizado é um modelo semelhante aos aqui enunciados, de forma a aproximar o comportamento real do sistema.

Simulando então o circuito a várias frequências, pode obter-se o comportamento deste multiplicador. Na tabela 7.1, estão os resultados obtidos nas diversas simulações. Estes resultados foram obtidos com a utilização de cursores no OrCAD PSPICE, tal como nas simulações já feitas neste documento, pelo que se omite a explicação de como se alcançaram estes valores.

f [MHz]	V_M [V]	$\{V_{out}\}_{med}$ [V]
10	0,5	1,67
20	0,5	1,71
50	0,5	1,75
100	0,5	1,76
200	0,5	1,76
500	0,5	1,77

Tabela 7.1 Resultados do multiplicador com carga aplicada

Como se pode verificar na tabela 7.1, o multiplicador consegue funcionar com um LED colocado na sua saída, em todas as frequências testadas. A tensão obtida na saída do multiplicador corresponde ao valor de queda de tensão no LED, o que indica o bom funcionamento do multiplicador. Numa primeira análise, em simulação, o multiplicador tem todas as condições para funcionar. No entanto, só testando o multiplicador com um LED na sua saída se poderá verificar se o multiplicador efectivamente funciona. Se o multiplicador

funcionar pode concluir-se que o sistema funciona, pois o multiplicador é o componente mais sensível do sistema de recolha de energia do ambiente.

Para avaliar o funcionamento real do multiplicador foi então colocado um LED HLMP-Q156 na sua saída, como se observa na figura 7.2.

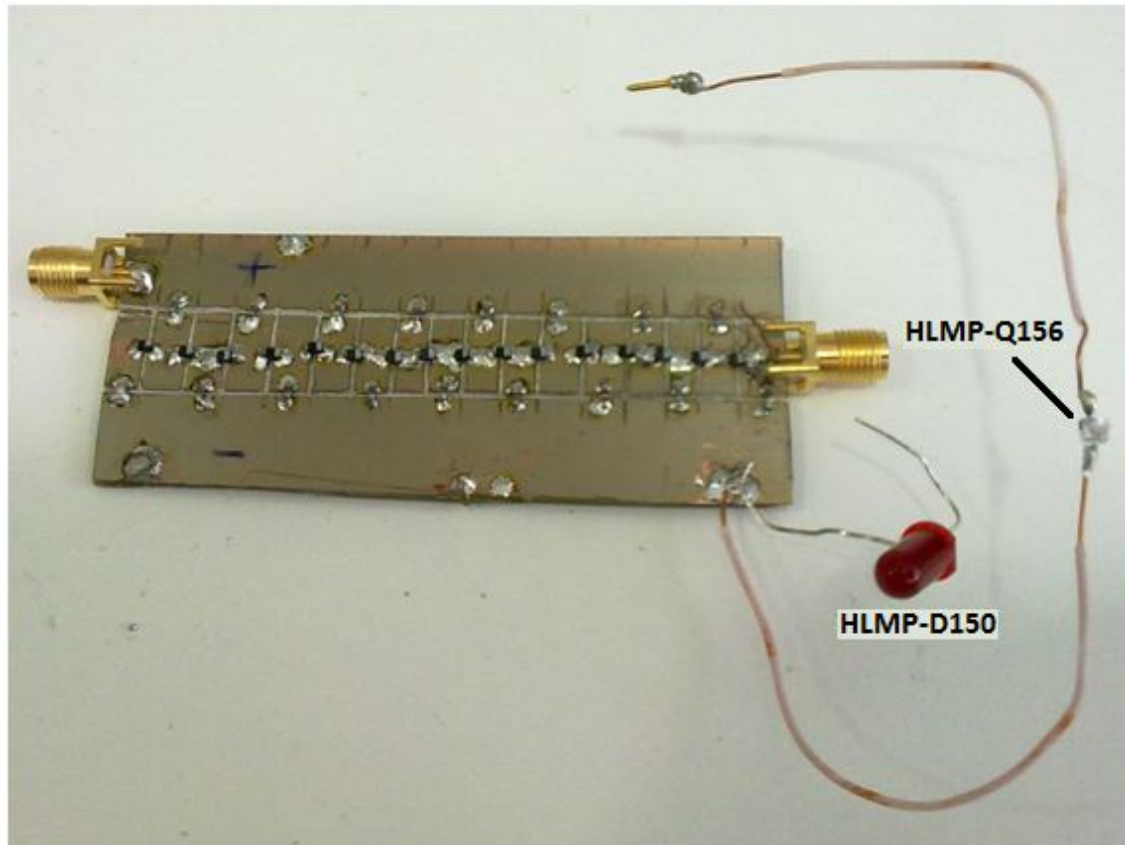


Figura 7.2 Multiplicador D: testes com carga

Antes de verificar se o multiplicador funciona quando ligado à antena que recolhe a energia, foi efectuado um teste ligando o multiplicador a uma fonte de sinais, cujo sinal gerado tem as seguintes características:

- Amplitude: 0.5 V
- Frequência: 20 MHz

Como já se viu na secção referente à implementação deste componente, em vazio o multiplicador funciona correctamente, produzindo na sua saída uma tensão suficiente ao correcto funcionamento do sistema de recolha de energia do ambiente nas condições aqui apresentadas. No entanto, ao ligar o multiplicador com o LED como carga à fonte de sinais, não se verificou nenhuma alteração do estado do LED, pelo que o multiplicador não está a funcionar correctamente. Na saída do multiplicador é observado um valor de tensão superior ao necessário para ligar o LED, no entanto, o multiplicador não tem a corrente necessária para ligar o dispositivo emissor de luz. Como a fonte gera potência suficiente para ligar o LED, o que se

verifica ligando directamente o LED aos seus terminais, pode concluir-se que as perdas existentes no multiplicador são demasiado elevadas, levando ao seu incorrecto funcionamento.

Assim, torna-se perceptível que este multiplicador não deverá funcionar, quando ligado à antena que recolhe energia RF, pois o seu funcionamento nessas condições irá degradar-se ainda mais. No entanto, como medida de avaliação dos próprios componentes do multiplicador, ligou-se o circuito multiplicador à antena e a saída do multiplicador foi observada recorrendo a um osciloscópio digital, semelhante ao já utilizado nos diversos testes efectuados aos multiplicadores. Na saída do multiplicador, em vazio, pode observar-se um sinal cujo valor médio se situa acima dos 6V, como se comprova na figura 7.3. No entanto, aplicando como carga ao multiplicador o LED já anteriormente utilizado, este não muda de estado, pelo que se confirma o mau funcionamento do circuito multiplicador de tensão.

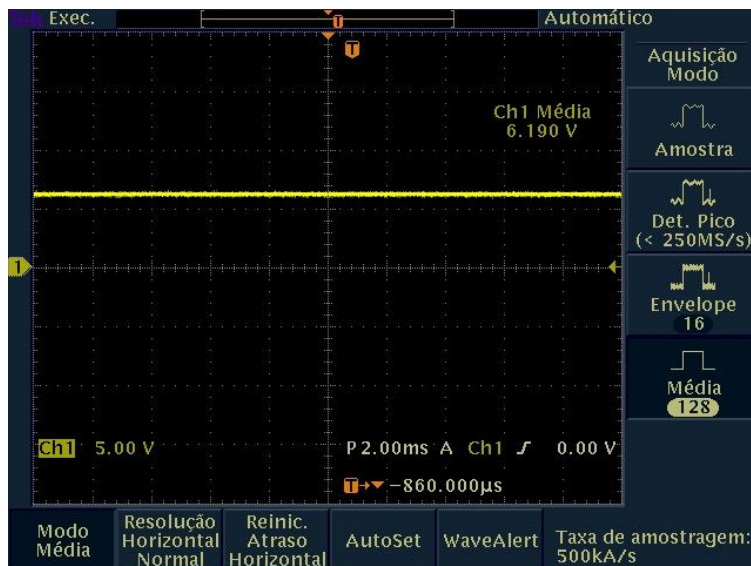


Figura 7.3 Sinal de saída do multiplicador D, em vazio.

Além das perdas já descritas, uma das razões para explicar o incorrecto funcionamento do multiplicador é o valor de capacidade utilizado nos diversos condensadores que constituem o circuito. Os condensadores têm um valor de capacidade de 8.2 pF, valor relativamente baixo. Este valor foi escolhido para que se conseguisse manter o funcionamento do multiplicador, tornando o sistema mais rápido, pois o tempo que se demora a atingir o valor de saída final do multiplicador depende da capacidade dos condensadores. No entanto, a placa FR4 utilizada introduz capacidades parasitas que podem ser da mesma ordem de grandeza da capacidade dos condensadores utilizados. Isto limita fortemente o funcionamento do multiplicador, pois os condensadores não estão a acumular energia como desejado. Além disso, o baixo valor de capacidade faz com que os condensadores acumulem uma carga obviamente baixa e esse valor de carga poderá nunca ser suficiente para ligar o LED existente na saída do multiplicador, ou seja, o multiplicador não consegue fornecer energia suficiente.

7.2 Implementação de um novo multiplicador

Tendo em conta as considerações enunciadas na secção anterior, foi implementado um novo multiplicador, denominado multiplicador E. A topologia seguida para este multiplicador foi a topologia de Dickson e consideraram-se quatro níveis de multiplicação. O circuito eléctrico do multiplicador E está presente na figura 7.4 e a sua implementação na figura 7.5, em seguida.

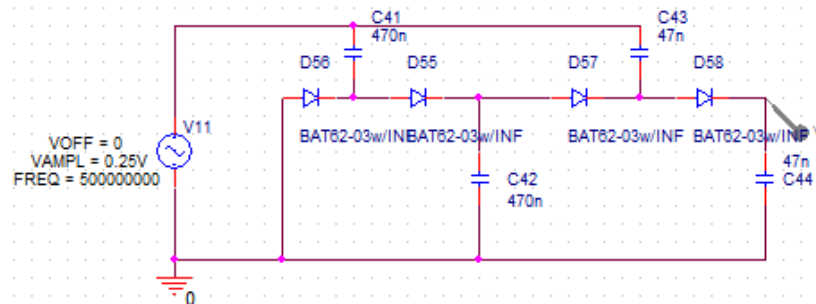


Figura 7.4 Multiplicador E: circuito eléctrico

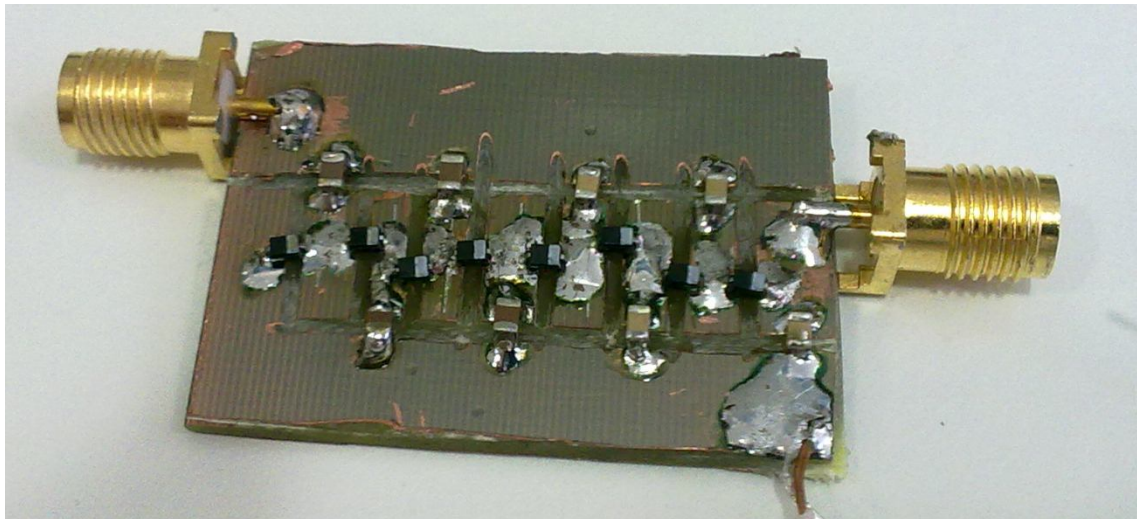


Figura 7.5 Multiplicador E: circuito implementado

Como se pode verificar na figura 7.4, os valores de capacidade utilizados são bastante superiores àqueles utilizados no multiplicador D. Além disso, optou-se por seguir uma topologia Dickson não clássica, considerando valores diferentes de capacidade nos diversos níveis. Isto permite que os condensadores dos primeiros níveis, com maior capacidade, suportem melhor a carga necessária, de forma a assegurar o correcto funcionamento do circuito. O multiplicador E foi implementado com apenas quatro níveis de multiplicação pois este valor é suficiente para atingir na saída do sistema um valor de tensão suficiente para o correcto funcionamento do sistema. Recorde-se que no caso do multiplicador D, quando ligado em vazio à antena, tinha nos seus terminais um valor de tensão acima dos 6 V. Com a redução do número de níveis do multiplicador espera ainda conseguir-se baixar as perdas existentes no circuito. Esta conclusão é intuitiva uma vez que existindo menos componentes e implementando o circuito numa área

menor, se têm obviamente menos perdas. Este multiplicador deverá então ser bastante mais lento que o anterior, pois os condensadores levarão um tempo razoavelmente superior a carregar, mas deve ser capaz de funcionar melhor que o anterior, uma vez que as capacidades parasitas da placa FR4 não terão grande influência no valor de capacidade total do multiplicador.

Dado tudo o que já foi referido nos multiplicadores anteriormente implementados, os testes a eles realizados, e o facto de neste novo multiplicador se utilizarem componentes semelhantes aos utilizados nos restantes multiplicadores, omite-se um estudo mais profundo do comportamento em vazio deste multiplicador. Assim, para testar o funcionamento do multiplicador considerou-se como carga um LED HLMP-D150 e o multiplicador foi ligado a uma fonte de sinal nas mesmas condições que o multiplicador anterior, ou seja:

- Amplitude: 0.5 V
- Frequência: 20 MHz

O resultado obtido neste teste pode ser visualizado na figura 7.6.

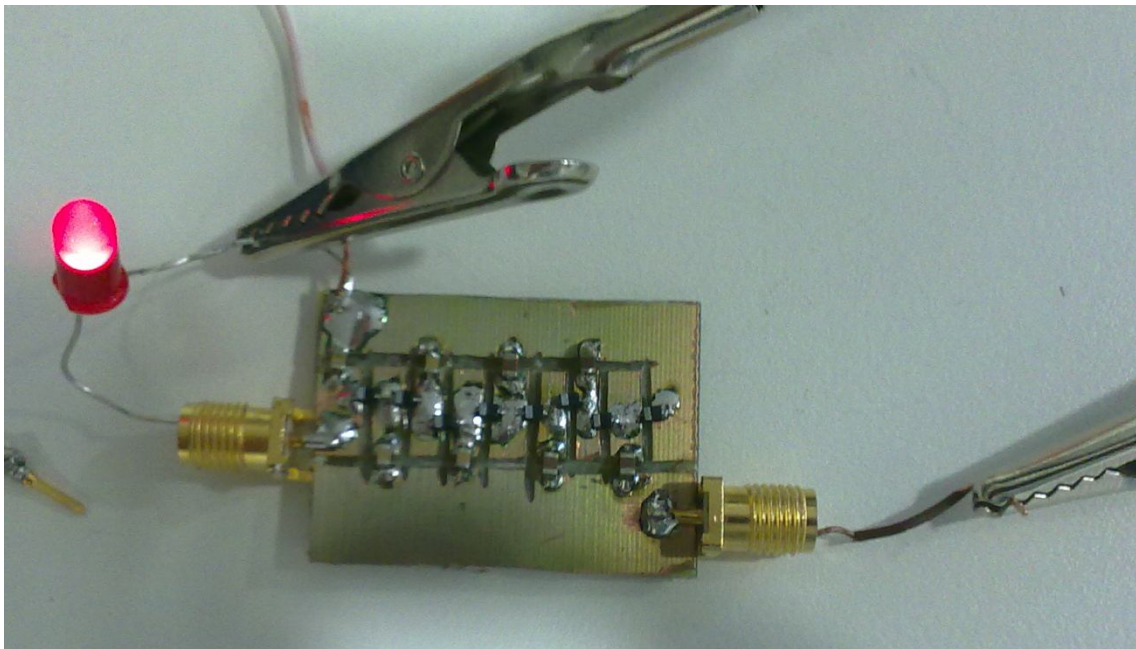


Figura 7.6 Multiplicador E: testes com um LED como carga

Como se pode verificar na figura 7.6, o multiplicador tem na sua saída uma quantidade de energia necessária para ligar o LED, o que é indicativo do seu correcto funcionamento, quando comparado com o caso anterior. Refira-se no entanto que foi preciso esperar cerca de 5 segundos para o LED mudar de estado, o que é indício da velocidade de funcionamento deste multiplicador.

Dados os resultados obtidos com este multiplicador quando ligado a uma fonte geradora de sinais, passou-se então aos testes ao multiplicador utilizando como fonte geradora a antena que recolhe energia do ambiente. De forma a minimizar as perdas, o multiplicador deve estar o mais próximo possível da antena receptora de sinal RF. A figura 7.7 mostra a solução encontrada para aproximar o multiplicador da antena. É de lembrar que o comprimento de onda neste caso é de cerca de 0.6 m, valor a partir do qual se terão problemas se não existir adaptação.

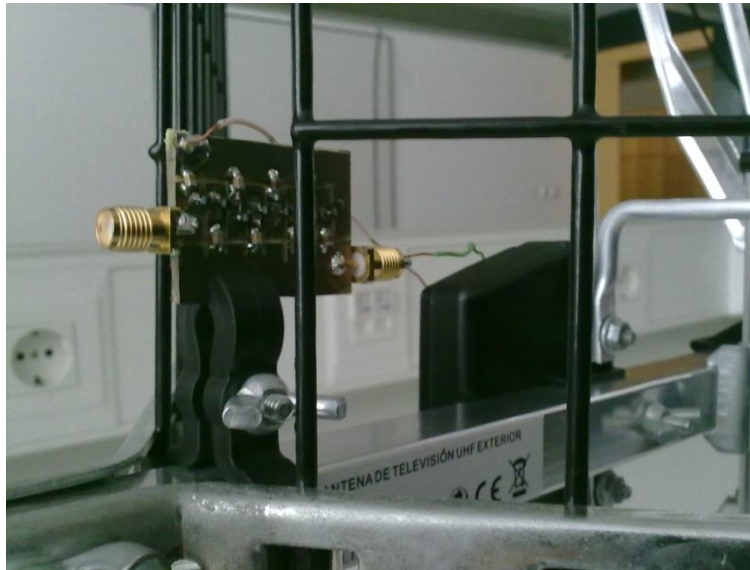


Figura 7.7 Antena com multiplicador E: montagem experimental

Ligando o multiplicador em vazio, pode observar-se nos seus terminais um sinal cujo valor médio de tensão é superior a 4 V, como indicado na figura 7.8. O valor de tensão atingido é assim suficiente para assegurar o funcionamento previsto do sistema de recolha de energia.

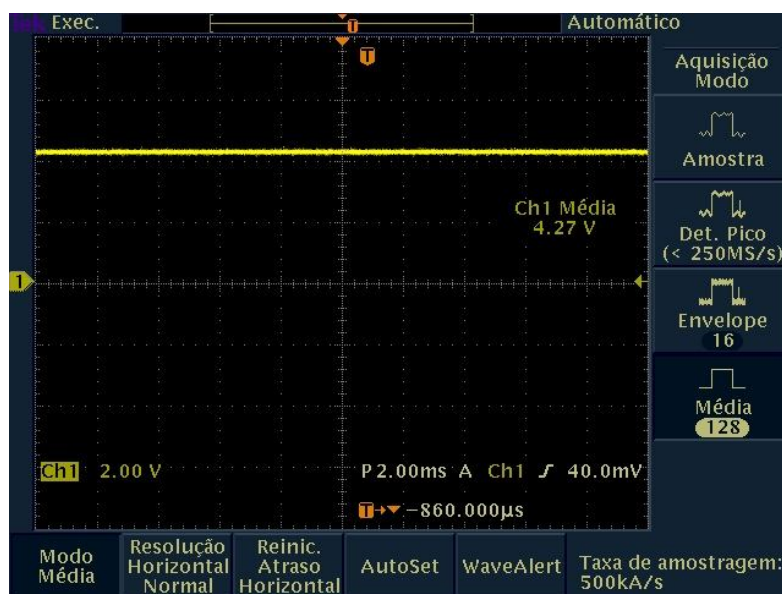


Figura 7.8 Sinal de saída do multiplicador E, em vazio.

No entanto, quando se liga na saída do multiplicador um LED (HLMP-D150 ou HLMP-Q156), o diodo emissor de luz permanece desligado pelo que o multiplicador, apesar de conseguir atingir um valor de tensão suficiente em vazio, não consegue acumular uma quantidade de energia necessária à mudança de estado do LED. Assim, este permanece desligado. Isto é indicativo que, apesar dos resultados até aqui obtidos, o Multiplicador E não é suficiente para implementar o sistema de recolha de energia electromagnética do ambiente. Mais uma vez as perdas existentes no multiplicador, assim como a baixa quantidade de energia RF obtida, determinam o incorrecto funcionamento do sistema.

Para tornar factível o sistema de recolha de energia do ambiente terão que ser efectuadas algumas alterações a fim de garantir o seu correcto funcionamento. Assim, deve considerar-se a modificação do multiplicador E, ou a implementação de um novo multiplicador tendo em conta as considerações a que se chegou na secção 5.5 deste documento. Sendo as perdas existentes no circuito multiplicador um dos factores predominantes que leva ao incorrecto funcionamento do sistema de recolha de energia, deve ser considerada a opção da implementação de um multiplicador recorrendo à tecnologia de circuito impresso, o que minimiza as perdas e assegura o correcto funcionamento dos componentes do multiplicador. As ligações neste tipo de implementação estão bastante mais próximas do ideal, comparando com a implementação efectivamente realizada e as impedâncias parasitas que levam o circuito a alterar o seu comportamento são minimizadas, o que melhorará efectivamente o comportamento do multiplicador. Esta alteração deverá ser suficiente para assegurar o correcto funcionamento do multiplicador e consequentemente do sistema de recolha de energia, uma vez que o multiplicador é o componente mais sensível deste. Outra alteração possível, mas menos desejável, é utilizar uma antena diferente, com um maior ganho. Recorde-se no entanto que um maior ganho normalmente significa menor largura de banda da antena, pelo que se poderão perder algumas fontes de energia electromagnética.

Recorrendo à tecnologia de circuito impresso, pode também mais facilmente integrar-se o regulador de tensão no sistema, minimizando as perdas existentes na ligação entre o bloco multiplicador e o bloco regulador.

Desta forma, e tendo em conta as considerações aqui apresentadas, consideram-se concluídos os testes realizados ao sistema de recolha de energia do ambiente e aos seus diversos blocos constituintes.

8 Conclusões e trabalho futuro

Apesar de alguns dos resultados obtidos na implementação do sistema de recolha de energia electromagnética não estarem de acordo com os desejados, pode concluir-se que esta Dissertação contém algumas conclusões positivas acerca de diversos aspectos do trabalho realizado.

Primeiro que tudo, dado o estudo realizado acerca da densidade espectral existente, é possível concluir que se podem implementar sistemas de recolha de energia electromagnética do ambiente que utilizem as fontes aqui consideradas, nomeadamente estações emissoras de televisão. A quantidade de energia que se deverá conseguir recolher será suficiente para alimentar diversos dispositivos móveis existentes, ou sensores de redes sem fios.

Conhecida a composição do sistema de recolha de energia, é possível afirmar que, em implementação, o multiplicador de tensão é o componente que mais cuidados requer. As perdas existentes neste componente levam ao mau funcionamento de todo o sistema de recolha de energia, como já se referiu na secção respectiva. No entanto, a solução para tornar factível o sistema de recolha de energia é bastante simples, bastando recorrer a uma tecnologia de circuito impresso para implementar o multiplicador de tensão. Com o recurso a esta tecnologia é possível eliminar grande parte das perdas actualmente existentes, garantindo o correcto funcionamento do multiplicador e consequentemente do sistema de recolha de energia. Os componentes a utilizar poderão inclusive ser semelhantes aos actuais, uma vez que estes componentes são utilizados em montagens superficiais. A principal diferença reside nas ligações entre os diversos componentes, e é aqui que reside actualmente o grande problema do multiplicador, levando ao seu incorrecto funcionamento. Com uma nova implementação do multiplicador, o sistema de recolha de energia funcionará como suposto. É de referir aqui as diferenças deste sistema com os demais encontrados na literatura, pois com este sistema é possível recolher energia do ambiente, sem a necessidade de utilizar malhas de adaptação de impedâncias, tornando este sistema extremamente simples, e com capacidades inclusivamente superiores aos sistemas similares. Recorde-se que o sistema cujas características se assemelham mais ao aqui proposto permite recolher 60 μW a 4.1 km de distância de uma antena emissora de sinal televisivo e, aqui, com o multiplicador correctamente implementado, poderá chegar-se a um valor superior de potência recolhida, a uma maior distância da antena emissora.

Como trabalho futuro, e dado o já explicado anteriormente, deve implementar-se o multiplicador recorrendo à tecnologia de circuito impresso, para validar o funcionamento do sistema de recolha completo, permitindo assim validar completamente as conclusões aqui retiradas.

(Esta página foi propositadamente deixada em branco)

9 Publicações

Ao longo do trabalho realizado nesta dissertação, foi redigido um artigo científico denominado “An UHF Wireless Power Harvesting System – Analysis and Design”. Este artigo foi apresentado na “10th International Conference on Applied Electromagnetics”, que decorreu entre os dias 25 e 29 de Setembro em Nis, Sérvia, e será publicado no “International Journal of Emerging Sciences”, em Dezembro de 2011 (Vol. 1, No. 4)

(Esta página foi propositadamente deixada em branco)

10 Bibliografia

- [1] Paradiso, J., & Starner, T. (Janeiro - Março de 2005). Energy scavenging for mobile and wireless electronics. *IEEE Pervasive Computing*, Vol. 4, Issue: 1 , pp. 18-27.
- [2] Sogorb, T., Llario, J., Pelegri, J., Lajara, R., & Alberola, J. (12-15 de Maio de 2008). Studying the Feasibility of Energy Harvesting from Broadcast RF Station for WSN. *Proceedings in IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference* , pp. 1360-1363.
- [3] Nishimoto, H., Kawahara, Y., & Asami, T. (1-4 de Novembro de 2010). Prototype implementation of ambient RF energy harvesting wireless sensor networks. *IEEE Sensors* , pp. 1282-1287.
- [4] *Logitech Wireless Solar Keyboard K750*. (s.d.). Obtido de Website de Logitech Corporation: <http://www.logitech.com/en-us/keyboards/keyboard/devices/k750-keyboard>
- [5] Starner, T. (1996). Human-powered wearable computing. *IBM Systems Journal* Vol. 35, Issue: 3-4 .
- [6] Khaligh, A., Zeng, P., & Zheng, C. (Março de 2010). Kinetic Energy Harvesting Using Piezoelectric and Electromagnetic Technologies—State of the Art. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 57, Issue: 3 , pp. 850-860.
- [7] Deffree, S. (8 de Julho de 2011). Obtido de EDN: http://www.edn.com/article/518760-Ambient_electromagnetic_energy_harvested_as_power_source.php
- [8] Sample, A., & Smith, J. (18-22 de Janeiro de 2009). Experimental Results with two Wireless Power Transfer Systems. *IEEE Radio and Wireless Symposium* , pp. 16-18.
- [9] Arrawatia, M., Baghini, M., & Kumar, G. (2011). RF energy harvesting system from cell towers in 900MHz band. *IEEE National Conference on Communications*, (pp. 1-5).
- [10] Olgun, U., Chen, C.-C., & Volakis, J. (2010). Wireless power harvesting with planar rectennas for 2.45 GHz RFIDs . *URSI International Symposium on Electromagnetic Theory*, (pp. 329-331).
- [11] Bouchouicha, D., Latrach, M., Dupont, F., & Ventura, L. (2010). An experimental evaluation of surrounding RF energy harvesting devices . *IEEE European Microwave Conference*, (pp. 381-384).

- [12] Jabbar, H., Song, Y., & Jeong, T. (Fevereiro de 2010). RF energy harvesting system and circuits for charging of mobile devices. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, Vol.56, Issue: 1 , pp. 247-253.
- [13] Pylarinos, L., Edward, S., & Rogers, S. *Charge Pumps, An Overview*. University of Toronto.
- [14] Cockcroft, J., & Walton, E. (1932). Production of high velocity positive ions. *Proceedings of the Royal Society*, Vol. 136 , pp. 619-632.
- [15] Weiner, M. (1969). Analysis of Cockcroft-Walton Voltage Multipliers with an Arbitrary Number of Stages. *The Review of Scientific Instruments*, Vol. 2, No. 2 , pp. 330-333.
- [16] Khalifa, M. (1969). *High-Voltage Engineering, Theory and Practice, Chapter 16*. Marcel Decker Inc.
- [17] Kuffel, E., & Zaengl, W. (1984). *High Voltage Engineering Fundamentals, Chapter 2*. Pergamon International Library.
- [18] Dickson, J. (Junho de 1976). On-chip High-Voltage Generation in NMOS Integrated Circuits Using an Improved Voltage Multiplier Technique. *IEEE J. Solid-State Circuits*, Vol. 11, no. 6 , pp. 374-378.
- [19] Muramatsu, M., & Koizumi, H. (2010). An experimental result using RF energy harvesting circuit with Dickson charge pump. *IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies*, (pp. 1-4).
- [20] Wang, J., Fu, Y., & Dong, L. (2009). Modeling of UHF voltage multiplier for radio-triggered wake-up circuit . *IEEE 10th Annual Wireless and Microwave Technology Conference* , (pp. 1-3).
- [21] Kobougias, I., & Tatakis, E. (2008). Optimal design of a Half Wave Cockcroft-Walton Voltage Multiplier with different capacitances per stage . *13th Power Electronics and Motion Control Conference*, (pp. 1274-1279).
- [22] ON Semiconductor. (2002). *Linear & Switching Voltage Regulator Handbook*. SCILLC.